This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

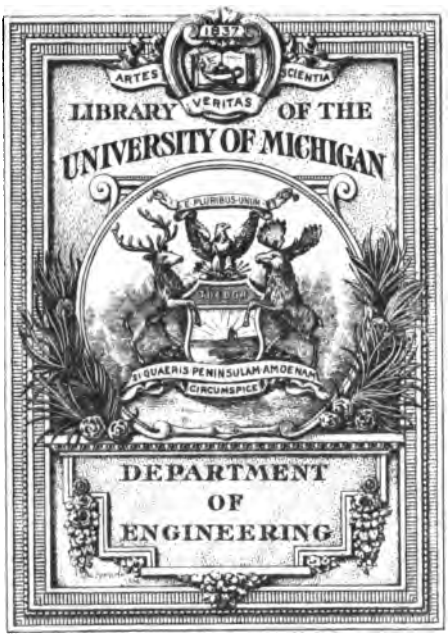
+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.



THE GIFT OF
Prof. Alex. Ziwet

East Anglia
Library
TL
575
.S897

3575
207

9.2

Alexander Ziwet

Ueber den

Flug der Vögel.

Ein Beitrag zur Erkenntniss der mechanischen und biologischen Probleme der activen Locomotion

von

Dr. Hans Strasser,
a. o. Prof. und Prosector der Anatomie zu Freiburg i. B.

(Separatabdruck aus der Jenaischen Zeitschrift für Naturwissenschaft Band XIX. N. F. XII.)

Jena,
Verlag von Gustav Fischer.
1885.

Vorbemerkungen.

Es möchte schwer zu entscheiden sein, was zuerst als Flug bezeichnet wurde, ob jede Art von Bewegung der Vögel durch die Luft oder nur diejenige mit regelmässigem Flügelschlag. Der Begriff Fliegen ist schliesslich auf alles Mögliche, auch auf jede Bewegung eines todten Körpers durch die Luft übertragen worden, die nicht gerade eine lothrechte Fallbewegung ist.

Immerhin handelt es sich dann auch heute noch um einen Vergleich, um ein Bild. Im eigentlichen Sinne des Wortes kann auch heute nur die active, durch die Kräfte des Organismus selbst unterhaltene und regulirte Ortsbewegung durch die Luft als Fliegen bezeichnet werden. Welcher Natur der Organismus ist, kommt dabei kaum in Betracht. Es kann sich um einen Vogel, eine Fledermaus, ein Insekt, ja um eine blosse Maschine handeln. Die Hauptsache ist die active Betheiligung des fliegenden Körpers. Ohne Formveränderung eines Körpers, und wo es sich um Locomotion handelt, ohne Bewegung der grösseren Massentheile gegeneinander keine Aktion. Aber auch der Flügel ist für die active Locomotion durch die Luft fast unbedingtes Erforderniss. So gehört also zum Flug der Flügelschlag; wenigstens hie und da eine Bewegung zwischen Flügel und Rumpf; dazwischen kann zeitweise der Körper wie ein starres Ganzes sich bewegen.

Man hat das Schweben und Kreisen als passiven Flug von der Bewegung mit regelmässigen Flügelschlägen als dem activen Fluge abgetrennt. Diese Art der Bezeichnung ist weder glücklich noch correkt. Die erst genannten Formen der Bewegung sind ohne irgend welche Action nicht durchführbar, und auch bei dem „activen Fluge" können unter Umständen Flügel und Rumpf während kürzerer Zeit zu einem fast starren Ganzen verbunden sein. Wir wollen daher den Flug mit regelmässig wiederholten Flügelschlägen als Ruderflug und falls er mit ganz gleichmässig sich wiederholenden Actionen und mit gleichmässiger Geschwindigkeit stattfindet, als Normalflug, bei im Mittel horinzontaler Fortbewegung endlich als horizontalen Normalflug genauer

285470

bezeichnen. Daneben wird gelegentlich auch von einem auf- oder absteigenden Normalfluge die Rede sein.

Vorliegende Schrift, das Ergebniss mehrjähriger Studien über die Flugbewegung, beschäftigt sich vorzugsweise mit dem horizontalen Normalfluge der Vögel.

Die Bedingungen der Flugbewegung werden, wie mir scheint, zunächst am besten gerade am normalen Fluge verfolgt, an diesem besonderen Falle der Flugbewegung, bei welchem die Thätigkeit des Apparates eine symmetrische ist und in regelmässigen, einander vollkommen gleichen Perioden sich wiederholt. Diese Flugweise ist bei vielen fliegenden Thieren weitaus die gebräuchlichste und wird wohl von allen wenigstens zeitweise angewendet. Jedenfalls ist sie von allen speciellen Formen der Flugbewegung die am meisten verbreitete, die am besten für die verschiedenen Flugthiere und Flugapparate vergleichbare; sie bietet für die Analyse die einfachsten Verhältnisse, enthält aber doch alle wesentlichen Momente, welche beim Fluge überhaupt in Betracht kommen. Sind für diese Flugart die Bedingungen klar gelegt, so ist damit für jede andere das Verständniss erleichtert.

Ich hoffe zeigen zu können, dass die Erforschung der mechanischen Bedingungen der Ortsbewegung im Allgemeinen, der Flugbewegung im Besondern das Interesse des Anatomen, Physiologen und Biologen näher berührt, als dies auf den ersten Blick scheinen möchte. Es handelt sich nicht einfach um die Aufklärung eines räthselhaften, den menschlichen Scharfsinn herausfordernden mechanischen Vorganges, auch nicht bloss darum, den Technikern der Luftschifffahrt hülfreich durch Rath oder Warnung an die Hand zu gehen. Es gilt für die Beurtheilung der Rolle, welche der locomotorische Apparat im Haushalte des einzelnen Thieres und bei der Entwicklung und Umformung der Arten spielt, eine richtige Grundlage zu gewinnen.

Gerade die Untersuchung der Flugapparate scheint nach dieser Richtung hin lehrreich zu werden. Denn im Reich der Lüfte mehr als anderswo, mehr als an der Erdoberfläche, am Grunde oder am Spiegel der Gewässer oder mitten in der Flut, ist die Möglichkeit der Ortsbewegung an einen engen Kreis von Mitteln gebunden. Nirgends so wie hier kommt zugleich dem Locomotionsapparat eine so dominirende Bedeutung für die ganze Organisation zu; daher die auffallende Gleichförmigkeit in den wesentlichen Verhältnissen der Flugapparate, und die Möglichkeit, den ganzen Körper als integrirenden Bestandtheil der Flugmaschine zu betrachten.

Es sind aber auch die locomotorischen Leistungen hier besser als anderswo physikalisch richtig zu messen und mit einander zu vergleichen. Wenn irgendwo, so muss hier eine gesetzmässige Beziehung wischen der Leistung — nicht der einmaligen, zufälligen, sondern der mittleren gewöhnlichen und der maximalen Leistung einerseits, dem Bau des Apparates und der Organisation des ganzen Thieres andererseits nachweisbar sein.

Freilich ist es nicht möglich, solchen Zielen näher zu kommen, wenn nicht die mechanischen Verhältnisse der Flugbewegung klar übersehen werden können. Die hier zu lösende Aufgabe ist eine ausserordentlich schwierige.

Man wird wohl davon absehen müssen, das Problem in seiner ganzen Allgemeinheit mathematisch zu behandeln, und lieber von ganz bestimmten Voraussetzungen, welche thatsächlich realisirt sind, von einer bestimmten, bekannten Disposition der Maschine und von bestimmten Annahmen über ihre Bewegung ausgehen: man wird zunächst aus diesen Voraussetzungen die übrigen Faktoren des mechanischen Vorganges, das ganze Getriebe, die Bewegungen und Kräfte zu bestimmen suchen. Dann lässt man einen Faktor variiren und untersucht den Sinn der Abänderung der andern. Die Beobachtung der verschiedenen Formen, in denen der Vorgang der Flugbewegung thatsächlich realisirt ist, wird zur Controle dienen. Indem man eine solche Untersuchung von hundert verschiedenen Ausgangspunkten aus unternimmt, gelangt man schliesslich zu einem gewissen Einblick in die gegenseitigen Abhängigkeitsverhältnisse. — Bei einer solchen Untersuchung spielt natürlich die Kenntniss der anatomischen Verhältnisse der verschiedenen Flugthiere und der thatsächlich vorkommenden Bewegung eine sehr wichtige Rolle. Diese Kenntniss, die möglichst lebendige Vorstellung von den realisirten Verhältnissen ist es gerade, was der Naturforscher vor dem reinen Mathematiker bei der Behandlung dieser Probleme voraus hat oder voraus haben kann.

Vielleicht habe ich schon in meiner Abhandlung: „Zur Lehre von der Ortsbewegung der Fische (Stuttgart, Ferd. Enke 1882)“ den Beweis geleistet, dass es möglich ist, für eine anscheinend complicirte Art von activer Locomotion das Gesetzmässige in dem Wechselspiel der inneren und äusseren Kräfte und Bewegungen zu erläutern und eine erste befriedigende Analyse der Mechanik dieser Bewegung zu geben, ohne dass dabei schon Alles bis ins Einzelne hinein genau mathematisch formulirt und berechnet wird; viel-

leicht wird mir zugegeben, dass eine derartige erste Bearbeitung überhaupt vorausgegangen sein muss, damit eine gründliche wissenschaftliche Bearbeitung aller Seiten des Problems beginnen kann. Aehnlich möchte es sich wohl auch bei der Flugbewegung verhalten.

Hier ist eine Analyse, welche das ganze Wechselspiel der inneren und äusseren Kräfte des Systems in Betracht zieht, höchstens bis jetzt von dem Wiener Physiker Prechtl versucht worden. Derselbe war auf das Genaueste mit dem Bau des Vogelkörpers vertraut und hatte die werthvollsten Erfahrungen über die Flugweise der Vögel gesammelt. Aber er war ein zu guter und eifriger Rechner. Die Neigung, fertige Formeln aufzustellen, verleitete ihn, allzu weitgehende vereinfachende Annahmen zu machen. Er lässt die Flügel in einer Querebene des Körpers auf- und niederschlagen, ohne wesentliche Drehung um seine Längsaxe, er beurtheilt die Widerstände der Luft nicht immer nach der wirklichen Bewegung der Oberflächen durch die Luft, sondern so, als ob die Vorwärtsgeschwindigkeit des Ganzen $= 0$ wäre; er macht sehr willkürliche Annahmen über die Geschwindigkeit des Flügelniederschlages und die Spannung der Muskeln, endlich geht seine ganze Untersuchung über die Beanspruchung der Muskulatur von einer vollständig unrichtigen Basis aus.

So lassen sich denn leider die Ergebnisse der von Prechtl angestellten Berechnungen nicht für unsere Zwecke verwerthen, und wir sind deshalb so gut wie allein auf uns selbst angewiesen.

Meinen mechanischen Auseinandersetzungen fehlt, wie ich selber am meisten bedaure, die Eleganz und Bündigkeit, welche die Werke der Physiker von Fach auszeichnet. Man möge dies als unvermeidliches Uebel mit in Kauf nehmen, da nun einmal ein Anatom die in Rede stehenden Fragen in die Hand nehmen und die dazu nothwendigen physikalischen Kenntnisse sich mühsam und auf Umwegen erwerben musste. Auch ist manches dem Fachmann ganz selbstverständlich erscheinende Verhältniss mit Absicht weitläufiger und wiederholt explicirt worden, weil diejenigen, die sich mit der Ortsbewegung in der Luft beschäftigt haben, thatsächlich diesem Verhältniss nicht genügend oder nicht in der richtigen Weise Rechnung getragen haben. Am meisten bedarf der Entschuldigung, dass ich es versäumt habe, gewisse Punkte durch Beobachtung sicher zu stellen, welche für die Theorie des Fluges von der grössten Bedeutung sind. Ich erkenne das Missliche dieses Umstandes selbst sehr gut an, sehe aber keine Möglichkeit, das

Fehlende in der nächsten Zeit selbst beizuschaffen. So lasse ich denn hinsichtlich der Form der Bewegung Manches fraglich, verwerthe die mit vieler Mühe gesammelten Beobachtungen nach Möglichkeit, bevor ihr Eindruck bei mir verwischt ist, mache auf die ins Auge zu fassenden Gesichtspunkte der Beobachtung aufmerksam und hoffe, dass Andere sich der Sache annehmen werden. Zur Klarlegung aller wichtigeren Verhältnisse der Form der Flugbewegung bedürfte es Jahre unausgesetzter Beschäftigung mit dem Gegenstande, des Aufsuchens besonders günstiger Gegenden für die Beobachtung und der Anwendung graphischer Methoden.

Zu den folgenden Erörterungen über die Flugbewegung bildet meine, in den Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft zu Halle (1880) veröffentlichte Abhandlung „Ueber die Grundbedingungen der activen Locomotion" die Einleitung und Grundlage. Ich habe dort die Begriffe der activen Locomotion, der Partialmassen und der Gesammtmasse, der inneren und äusseren Kräfte des Systems, des nützlichen und des schädlichen locomotorischen Widerstandes, der locomotorischen Kraft und der locomotorischen Leistung genauer definirt [1]).

Beim Normalflug nun besteht die locomotorische Leistung in verticaler Richtung offenbar in erster Linie in der Ueberwindung der abwärts treibenden Wirkung der Schwerkraft, die horizontale locomotorische Leistung aber in der horizontalen Fortbewegung des Ganzen gegen die in einem bestimmten Verhältniss widerstehende Luft. Es handelt sich dabei, wie gesagt, um eine im Mittel gleichförmige und geradlinige Verschiebung des ganzen Körpers (oder Systemes) durch periodisch in gleicher Weise sich wiederholende und symmetrische innere Bewegungen. Wir können die einzelnen kleinen Zeitabschnitte der Periode als Phasen bezeichnen und besonders numeriren. Je in entsprechend numerirten Phasen der verschiedenen Perioden muss dann die Configuration und Configurationsänderung oder die innere Bewegung des Systems und seiner Theile die nämliche, und die Zeit, die von einer Phase bis zur nächsten gleich numerirten Phase verstreicht, muss stets der Dauer einer Periode gleich sein. Wäh-

---

[1]) Auch in der bereits citirten Schrift, welche von der Ortsbewegung der Fische handelt, finden sich Erörterungen über allgemeine Fragen der activen Locomotion.

rend eines solchen Zeitraums können nun möglicherweise einzelne Theile des Systems sich absolut im Raume, sowohl in horizontaler als in verticaler Richtung um eine gewisse Wegstrecke verschieben, es muss dann aber diese Verschiebung an sämmtlichen Punkten des Systems in gleicher Weise zu beobachten sein; sämmtliche Theilchen müssen sich während der Dauer einer Periode genau um denselben Betrag und in derselben Richtung verschoben haben, weil nur unter dieser Bedingung nach Ablauf der Periode die relative Stellung der Theilchen zu einander wieder ganz dieselbe sein kann. Und in jeder folgenden Periode muss sich die absolute Verschiebung des Ganzen (resp. sämmtlicher einzelner Theilchen) wieder ebenso verhalten, da ja die Bewegung im Mittel, abgesehen von den periodischen Schwankungen, als gleichförmig angenommen wird. Ist die mittlere Geschwindigkeit in horizontaler und verticaler Richtung Vs beziehungsweise Vv und die Dauer einer Periode T, so beträgt die Verschiebung der Theilchen und des Ganzen pro Periode $Vs.T$ und $Vv.T$, ganz gleichgültig, wie wir den Beginn der Periode festsetzen.

Daraus folgt dann schliesslich, dass auch in irgend einer bestimmten Phase oder in irgend einem bestimmten Theil der Periode die absolute Bewegung eines bestimmten Theilchens gegenüber der Umgebung in der einen wie in der andern Periode genau dieselbe ist.

Werden dieselben Oberflächen in derselben Stellung und mit derselben Geschwindigkeit gegen die Luft bewegt, so müssen auch die äusseren Widerstände in gleicher Weise wachgerufen werden. Die Schwere wirkt natürlich stets in derselben Weise; stimmen aber die äusseren Kräfte und die absoluten Bewegungen überein, so muss solches auch hinsichtlich der treibenden oder hindernden inneren Kräfte des Apparates Geltung haben.

In entsprechenden Phasen ist also nicht nur die relative Stellung der Theilchen zu einander, nicht nur die innere Bewegung des Systems, sondern auch die äussere Bewegung der Theile und des Ganzen stets dieselbe, und auch mit Bezug auf die inneren und äusseren Kräfte herrscht vollständige Uebereinstimmung.

Wir können die Bewegung irgend eines Theilchens jederzeit auffassen als die Combination 1) einer Bewegung gegenüber dem gemeinsamen Schwerpunkte des Systems und 2) einer Bewegung mit dem gemeinsamen Schwerpunkte.

Weder die relative Bewegung irgend eines Theil-

chens gegenüber dem Massenmittelpunkte des Ganzen, noch die absolute Bewegung des Gesammtschwerpunktes, welche von dem Theilchen mitgemacht wird, erfährt im Verlaufe einer Periode resultando irgend welche Beschleunigung oder Verzögerung.

Die gesammten Kräfte, welche auf irgend einen Abschnitt des Körpers einwirken, und von denen jede für sich allein eine Aenderung des Bewegungszustandes dieses Theiles verursachen würde, heben sich also zusammen im Verlauf einer Periode gegenseitig auf.

Dasselbe gilt für die Kräfte, welche jede für sich die Bewegung der Gesammtmasse oder des Gesammtschwerpunktes zu ändern vermöchten. Es sind das die äusseren Kräfte des Systems (die inneren Kräfte an sich sind ja ohne Einfluss auf den Bewegungszustand des Gesammtmassen-Mittelpunktes.)

Auch diese äussern Kräfte also halten sich im Laufe einer Periode gegenseitig das Gleichgewicht, die beschleunigende Einwirkung derselben auf die Bewegung des Massenmittelpunktes ist pro Periode resultirend = *o*.

Fassen wir zunächst die äusseren Kräfte ins Auge. Es handelt sich hier nur um die Schwerkraft und um die Widerstände der Luft.

Die Schwere an sich beschleunigt alle Theile in derselben Weise und bewirkt keine Drehung des Ganzen oder einzelner Theile um den Massenmittelpunkt und keine Configurationsänderung. Die äusseren Widerstände dagegen sind Kräften gleichzusetzen, welche an der Oberfläche angreifen; sie wirken nicht auf alle gleich schweren Theilchen in gleicher Grösse und Richtung, können also die gegenseitige Lage der Theilchen zu einander ändern, innere Bewegungen hervorrufen, auch unter Umständen dem Ganzen einen Impuls zur Drehbewegung um den Schwerpunkt ertheilen. Zugleich aber beeinflussen sie den Bewegungszustand der Gesammtmasse resp. des Massenmittelpunktes so, als ob sie in gleicher Grösse und Richtung auf die im Massenmittelpunkt concentrirt gedachte Gesammtmasse selbst wirkten.

Das gesammte System muss nun aber von Periode zu Periode genau wieder in dieselbe Stellung zurückkehren und kann demnach im Verlaufe einer Periode resultirend keine Beschleunigung der Drehbewegung parallel irgend einer der drei Haupt-

ebenen erfahren haben. Demnach muss auch die drehende Einwirkung der äusseren Widerstände resultirend im Verlauf einer Periode $= o$ sein, da ja die inneren Kräfte an sich zu keiner Zeit dem ganzen System einen Impuls zur Drehung zu ertheilen vermögen.

Was endlich die Bewegung des Gesammtmassen-Mittelpunktes betrifft, so können wir dieselbe zerlegen in eine verticale, in eine horizontale in der Symmetrieebene des Apparates erfolgende, und in eine horizontale aber zur Symmetrieebene des Thieres senkrecht gerichtete Bewegung. Diese Bewegungsrichtungen sollen ein für alle mal folgendermassen bezeichnet werden:

Die verticale Richtung mit v, die horizontale Richtung vorwärts mit z, die quere Richtung mit q.

Die Wirkung sämmtlicher äusserer Widerstände zur Aenderung der Bewegung des Gesammtschwerpunktes in der v-Richtung und in der z-Richtung ist resultirend pro Periode $= o$.

Mit Bezug auf die q-Richtung aber ist die Einwirkung auf die Bewegung der Gesammtmasse nicht nur für den Zeitraum einer ganzen Periode, sondern auch für jede einzelne Phase $= o$, da der Apparat laut Voraussetzung symmetrisch gebaut ist und die Oberflächen seiner beiden Hälften sich symmetrisch gegenüber einem an sich homogenen und unbewegt gedachten äusseren Medium, der Luft bewegen.

Für die Bewegungsänderung des Ganzen in der z-Richtung können nur die z-Componenten der gesammten äusseren Widerstände in Betracht kommen; wir wollen ihre Einwirkung durch das Symbol (WzT) bezeichnen. Sie ist pro Periode resultirend $= o$. Für die Bewegungsänderung des Ganzen in der v-Richtung kommen in Betracht die Einwirkung der Schwere und diejenige der v-Componenten sämmtlicher äusserer Widerstände. Bedeutet P die Wirkung der Schwere auf die Gesammtmasse M in der Sekunde und T die Zeit einer Periode, so ist $P.T$ die Einwirkung der Schwere pro Periode.

Die v-Componenten der gesammten Widerstände am System während einer Periode sollen durch das Symbol $(WgvT)$ bezeichnet werden. Dieselben müssen pro Periode der beschleunigenden Einwirkung der Schwere gerade das Gleichgewicht halten.

Es ist also

$$\text{I)}\quad (WgzT) = o$$
$$\text{II)}\quad (WgvT) + P.T = o$$

Diese Sätze haben ihre Gültigkeit für jede Form des Normalfluges, also für jede durch regelmässig periodische und symmetrische Aktion vermittelte, im Mittel geradlinige und gleichförmige Ortsbewegung durch die Luft, mag nun die mittlere Bewegungsrichtung eine horizontale oder eine mehr oder weniger auf- oder absteigende sein. Verschiedenheiten ergeben sich nur, sobald man den pro Periode zurückgelegten Weg ins Auge fasst, wovon bei der Ableitung obiger Sätze nicht die Rede gewesen ist.

Die graphische oder geometrische Methode kann uns dazu dienen, die oben ermittelten Gleichgewichts-Beziehungen noch anschaulicher zu machen und weitere Folgerungen daran zu knüpfen. Wir fassen zunächst bloss die verticalen äusseren Kräfte ins Auge und stellen die Grösse der beschleunigenden Wirkung, welche jede Kraft für sich allein auf die Gesammtmasse haben muss, wenn sie während bestimmter Zeit gleichmässig wirkt, durch Rechtecke dar, deren verticale Seiten sich verhalten wie die Einwirkungen der Kräfte für dieselbe Zeit oder kurz gesagt, wie die Kräfte selbst, deren horizontale Seiten dagegen sich zu einander verhalten, wie die verschiedenen Zeiten der Einwirkung der verschiedenen Kräfte. Diese Felder sollen als Kräftefelder bezeichnet werden. In Fig. 1 kann die horizontale Linie XX als die Abscissenaxe der Zeiten bezeichnet werden. Der Fortschritt parallel dieser Axe nach rechts hin sei ein Mass für den Fortschritt der Zeit. a repräsentire den Anfang der Periode. Man theile die Periode in n gleiche Phasen, so wird jede Dauer einer Phase durch einen bestimmten gleich grossen Theil der Linie XX repräsentirt, die drei ersten Phasen z. B. durch ab, bc und cd. Jeder Phase entspricht eine gewisse Grösse der ins Auge gefassten äusseren Kraft; für den Beginn der ersten, zweiten und dritten Phase seien diese Kraftgrössen porportional den in α, β und γ gipfelnden verticalen Linien, die man als Ordinaten auffassen kann. Aendert sich während der einzelnen Phasen die Grösse der Kraft nicht, so ist die Wirkung derselben auf die Gesammtmasse in der 1, 2. u. 3. Phase proportional den Rechtecken ab, βc, γd; die Ge-

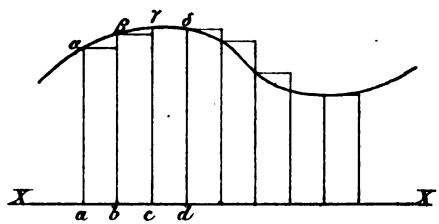


Fig. 1.

sammtwirkung in den 3 Phasen aber wird gemessen durch die Summe der 3 Rechtecke.

Aendert die Kraft ihre Grösse stetig, so liegen die Gipfelpunkte der Kraftordinaten, mag man die Phasen so zahlreich und klein wählen, als nur irgend denkbar, immer in einer stetigen Curve (Kräftecurve). Nimmt man die Phasen genügend klein, so wird der Fehler, der gemacht wird, indem man die Grösse der Kraft für dieselbe Phase als constant, als zu Ende gleichwie zu Anfange der Phase annimmt, immer kleiner. Das Feld, welches von einem bestimmten Theil der Zeitabscisse und der zugehörigen Kräftecurve begrenzt wird, ist daher in Wirklichkeit das Kräftefeld für den betreffenden Zeitabschnitt; es ist das Mass für die Einwirkung der ins Auge gefassten Kraft auf die Gesammtmasse während dieser Zeit; also für den Zuwachs an Geschwindigkeit, welchen die Gesammtmasse in dieser Zeit durch jene Kraft erfahren würde.

Ist die einwirkende Kraft constant, wie z. B. die Schwere, so ist die Kräftecurve eine gerade Linie, welche der Abscissenaxe parallel läuft. Wird der äussere Widerstand stossweise entwickelt, und nehmen wir an, dass derselbe nur während der einen Hälfte der Periode und in dieser Zeit stets mit gleicher Grösse einwirkt, so muss das Kräftefeld der verticalen Componente des Widerstandes, um demjenigen der Schwere PT gleich zu sein, die doppelte Höhe haben, weil es nur halb so lang ist; (Wv) muss jederzeit $= 2P$ sein. Die Widerstandskraft müsste $= 3P$ sein, wenn ihre Wirkung sich nur über den dritten Theil der Periode erstreckt.

In Wirklichkeit ändert sich nun aber die Grösse des resultirenden verticalen Widerstandes nur allmählich; derselbe ist im allgemeinen einer aufwärts treibenden Kraft gleich; es ist aber nicht ausgeschlossen, dass in einem Theil der Periode die äusseren Widerstände eine abwärts gerichtete Resultirende haben können; dann müssen die Ordinaten der Curve nach der andern Seite der Abscissenaxe aufgetragen werden, die Widerstandscurve liegt dann also unter der Abscissenaxe. Der von diesem Theil der Curve und der Abscissenachse eingeschlossene Theil des Kräftefeldes entspricht der abwärts gerichteten Einwirkung auf die Gesammtmasse.

In Fig. 2 sei *abcdefgh* die Curve der verticalen resultirenden Widerstandskräfte mit Bezug auf die Abscissenaxe xX; es ist dann das vertical schraffirte Feld *abcdea* das Mass der Einwirkung zur Hebung der Gesammtmasse in der Zeit $T = ag =$ einer Periode; *efg* das Mass der abwärts gerichteten Einwirkung (zum

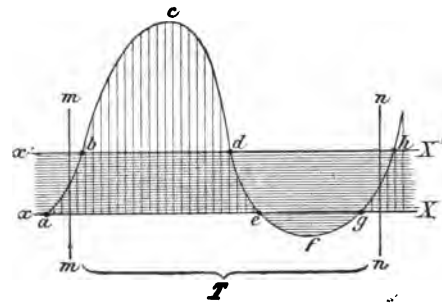


Fig. 2.

Unterschied horizontal schraffirt). Zieht man oben an $x\,X$ eine Parallele $x^1\,X_1$ im Abstand $xx^1 = P$, so repräsentirt das Feld zwischen den beiden Parallelen die Einwirkung der Schwere; es ist, weil diese abwärts gerichtet ist, ebenfalls horizontal schraffirt. Offenbar heben sich der durch das Feld *a b d e* gemessene Theil der aufwärts gerichteten Einwirkungen des Widerstandes und der durch eben dasselbe Feld gemessene Theil der abwärts gerichteten Wirkung der Schwere gegenseitig auf. Soweit verticale und horizontale Schraffirung sich überkreuzen, annulliren sich die beiden Einflüsse. Das Feld *bcd* entspricht der übrig bleibenden Wirkung nach oben, das Feld *defgh* der übrig bleibenden Wirkung nach unten in der Zeit $bh = T$.

Die Curve *abcdefgh* . . . . kann also als die resultirende Kräftecurve sämmtlicher äussern verticalen Kräfte aufgefasst werden, wobei aber $x^1\,X^1$ die zugehörige Abscissenaxe der Zeit ist. *bcd* ist der positive, *ab* und *defg* der negative Theil der Curve, ersterem entsprechen resultirende Krafteinwirkungen nach oben, letzterem solche nach unten.

Von dieser Art der graphischen Darstellung werden wir im Folgenden ausgiebigen Gebrauch machen.

Um die während einer Periode von dem Massenmittelpunkte zurückgelegten Wege zu beurtheilen, gehen wir von der Curve der resultirenden verticalen Kräfte aus, welche sich also nur dadurch von der Widerstandscurve unterscheidet, dass die Abscissenaxe überall um den Betrag P höher liegt.

Wir wollen zunächst von der verticalen Geschwindigkeit, welche der Körper zu Anfang der Periode besitzt, absehen (ist dieselbe $= c$, so legt der Körper vermöge derselben in der Periode T den Weg cT zurück). Erhält die Masse in irgend einer Phase eine verticale Beschleunigung φ, und ist am Ende dieser Phase die Zeit t der Periode verflossen, so legt die Masse infolge dieser Beschleunigung φ in dem Rest der Periode T-t ein plus an Weg zurück, das $= (T\text{-}t)\,\varphi$ ist. Wir können v und φ als positiv bezeichnen, wenn

es sich um eine Bewegung oder eine Bewegungsbeschleunigung nach oben handelt, im umgekehrten Falle als negativ.

Errichtet man auf der Abscissenaxe aa^1 (Fig. 3) als Kathete

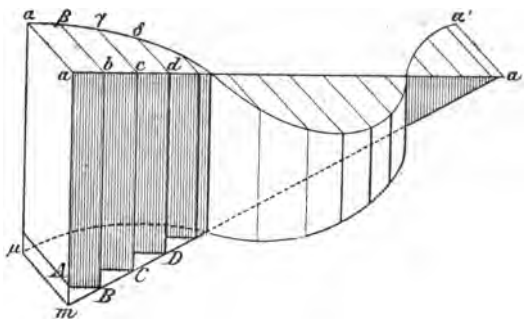


Fig. 3.

ein rechtwinkliges Dreieck ama^1, welches auf der Ebene der Kräftecurve $\alpha\beta\gamma\delta$ .... senkrecht steht und zwar so, dass der rechte Winkel dem Anfang der Periode entspricht und setzt man die Kathete $am = T$, so ist für irgend einen Moment der Periode jeweilen die zu am parallele Linie, welche den entsprechenden Punkt der Zeitabscisse mit der Hypothenuse des Dreiecks verbindet, ein Maass für den noch übrig bleibenden Abschnitt der Periode.

Ist nun z. B. ab, bc, cd etc. (Fig. 3) die Zeitdauer der ersten, zweiten dritten Phase der Periode u. s. w., $a\alpha\beta b$, $b\beta\gamma c$, $c\gamma\delta d$ u. s. w. das Maass der in diesen Phasen zu Stande kommenden Beschleunigung, so sind die Prismen $a\alpha\beta B$, $b\beta\gamma C$, $c\delta D$ u. s. w. die Maasse für die in Folge dieser einzelnen Beschleunigungen im Laufe der Periode zurückgelegten Wege. Aehnlich verhält es sich an jeder anderen Stelle, auch bei den umgekehrt gerichteten Beschleunigungen; nur sind im letzteren Falle die Wege umgekehrt gerichtet, die entsprechenden körperlichen Maasse, welche auf der entgegengesetzten Seite des Dreieckes maa^1 liegen, sind also gleichsam mit dem entgegengesetzten Vorzeichen behaftet.

Je zahlreicher und kleiner man nun die Phasen nimmt, desto mehr verschwinden die Zwischenräume, welche zwischen der Unterfläche der Prismen und der sie berührenden Ebene $m\mu$ $\alpha^1 a^1$ übrig bleiben.

Man erkennt also, dass man den Weg, welcher in Folge der in der Periode selbst wirkenden Kräfte zurückgelegt wird, folgendermassen graphisch darstellen kann. Man legt durch die dem

Ende der Periode entsprechende Kraftordinate eine Ebene, welche sich mit der Ebene der Kräftecurve schneidet, und nun wird die Kräftecurve senkrecht zu ihrer Ebene auf jene schräge zweite Ebene projicirt. Führt man nun durch die Grenzen der positiven Kräftefelder und ihrer Projectionen eine gerade Linie so herum, dass sie zur Ebene der Kräftecurve stets senkrecht steht, so umschreibt man zwischen den beiden Ebenen die Räume, welche den positiven Wegen entsprechen; führt man die Gerade in derselben Weise um die negativen Kräftefelder und ihre Projektionen herum, so umschreibt man die Räume, welche den negativen Wegstrecken entsprechen [1]).

Mit Hülfe dieser graphischen Methode gelingt es, die Verhältnisse, von denen die Grösse des pro Periode zurückgelegten Weges abhängt, zu übersehen. Bei derselben Curve der resultirenden Kräfte kann offenbar der Weg, welcher pro Periode einzig in Folge der während derselben stattfindenden Krafteinwirkung zurückgelegt werden muss, sehr verschieden sein, je nachdem der Anfang der Periode und die Anfangsgeschwindigkeit o mit dem einen oder dem anderen Theil der Curve zusammenfällt.

Fig. 3 und die umstehende Fig. 4 können als Erläuterung dienen. Fig. 3 entspricht dem Fall, in welchem zu Beginn der Periode starke auftreibende Kräfte wirken, ebenso am Schluss der Periode, während in den mittleren Theilen derselben die resultirende Einwirkung abwärts gerichtet ist.

Fig. 4 entspricht demjenigen Falle, in welchem die auftreibende Einwirkung ganz in den Anfang, die abwärts gerichtete Einwirkung ganz in den Endtheil der Periode fällt.

Im ersten Fall entspricht der auftreibenden Kraft wegen ihrer frühzeitigen Wirkung im Beginn der Periode ein Wegkörper von besonders grosser, wegen ihrer Wirkung am Schluss der

---

[1]) Man könnte sich auch die Abscisse aa^1 mit den anliegenden Kräftefeldern als starr und materiell und um einen kleinen Winkel um die letzte Kraftordinate der Periode als Drehungaxe gedreht denken. Die von den verschiedenen Kräftefeldern durchmessenen Räume würden dann ebenfalls ein Maass für die in Folge der betreffenden Kraftwirkungen in der Periode durchmessenen Wegstrecken abgeben. Diese einfachere Methode wird nun leicht als correct erkannt werden, nachdem obige Auseinandersetzung vorausgegangen ist.

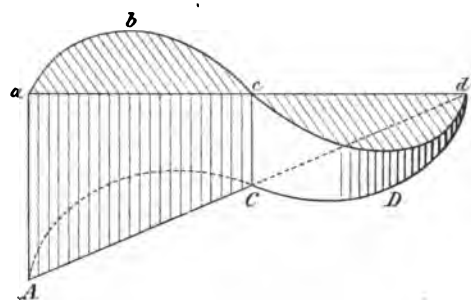


Fig. 4.

Periode ein solcher von verhältnissmässig kleiner Höhe. Den abwärts treibenden Kräften aber entspricht ein Wegkörper von mittlerer Höhe; die Basis der beiden positiven Wegkörper ist im Ganzen gleich gross wie die Basis des einen negativen Wegkörpers, deshalb mögen in diesem Falle der gesammte positive und negative Wegkörper gleich gross, ihre Summme mag ungefähr $= o$ sein.

Anders verhält es sich im zweiten Fall; hier ist wieder die Basis des positiven Wegkörpers gleich der des negativen, aber die Höhe des ersteren bedeutend grösser; es kann also die Summe der beiden nicht $= o$ sein; es muss resultirend pro Periode ein verhältnissmässig grosser Weg aufwärts zurückgelegt werden.

Im ersten Fall fällt die tiefste Lage des Ganzen annähernd mit dem Maximum der auftreibenden Kraft zusammen, vorausgesetzt, dass das Aufsteigen und Absteigen der Kräftecurve annähernd in symmetrischer Weise geschieht; auf dieses folgt eine Hebung des Körpers, ein Maximum der Aufwärtsbewegung wird erreicht, dann tritt Verzögerung ein und gänzliche Hemmung ungefähr zugleich mit dem Maximum der abwärts treibenden Kräfte; der Körper sinkt, anfangs beschleunigt, nachher unter Verzögerung, bis schliesslich am Ende der Periode die Geschwindigkeit wieder $= o$ ist.

Es ergeben sich hier pro Periode 2 Nullpunkte der Bewegung; der Körper oscillirt um ein mittleres Niveau.

Der Weg kann also bei vollkommen periodischem Gleichgewicht der Kräfte ein sehr verschiedener sein. Seine Grösse kann auch bei derselben Form der Kräftecurve der gesammten äusseren Einwirkungen ein verschiedener sein je nach der Anfangs-

geschwindigkeit, welche gleichzeitig mit einem bestimmten Punkte der Kräftecurve vorhanden ist.

Auch sonst hängt die Grösse des Weges ab von der Form der Kräffecurve. Je rascher sich überhaupt die Krafteinwirkung einer Periode gleich im Beginn abspielt, desto grösser ist der in ihrer Richtung zurückgelegte Weg. Das Maximum ist erreicht, wenn die ganze Einwirkung momentan geschieht und als Anfangsgeschwindigkeit beinahe über die ganze Dauer der Periode fortwirkt.

Dies gilt nun nicht bloss für die verticale Bewegung, sondern in ganz ähnlicher Weise auch für diejenige in der z-Richtung.

Beim horizontalen Normalfluge sind die in verticaler Richtung pro Periode vom Ganzen zurückgelegten Wege $= o$ in der z-Richtung, dagegen wird im Allgemeinen pro Periode eine bestimmte horizontale Wegstrecke zurückgelegt. Aus dem soeben Erörterten ergiebt sich aber, dass auch ein auf- oder absteigender Normalflug möglich ist, indem bei vollkommenem Gleichgewicht der äusseren Kräfte pro Periode auch in verticaler Richtung ein bestimmter Weg zurückgelegt werden kann.

In allen diesen Fällen ist die Bewegung des Ganzen eine oscillirende, und nur die Bewegung der Mittellagen, um welche die Oscillation stattfindet, kann als eine gleichförmige geradlinige bezeichnet werden, und zwar zerlegt sich beim horizontalen Normalflug die Bewegung des Ganzen in eine verticale Oscillation um einen Punkt, der in demselben Niveau bleibt, und in eine Oscillation in der z-Richtung um diesen selben Punkt, der sich in der z-Richtung mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt.

Es gilt nun, zu untersuchen, wie bei den fliegenden Thieren und speziell den Vögeln die nothwendigen äusseren Bedingungen des **horizontalen** Normalfluges durch die innere Thätigkeit des Organismus hervorgerufen werden.

Zunächst ist die Form der Bewegung durch Beobachtung zu ermitteln. Es ist genau festzustellen, wie sich nach Raum und Zeit die Theilchen des Körpers gegeneinander und gegenüber der Aussenwelt verschieben. Daraus ergiebt sich die Möglichkeit, die äusseren Widerstände zu beurtheilen, die Widerstandscurven und endlich die resultirenden Curven der äusseren Kräfte für die v- und z-Richtung festzustellen.

Zweitens handelt es sich darum, Grösse und Richtung der

inneren Kräfte des Apparates in ihrer Vertheilung je nach Ort und Zeit kennen zu lernen.

In dritter Linie ist zu untersuchen, in welchen Organen die inneren Kräfte wachgerufen werden und wie diese Organe bei der in ihnen stattfindenden Spannungsentwicklung und Formveränderung beansprucht werden.

Daran schliessen sich die Fragen nach der Möglichkeit der Abänderung von Apparat und Bewegung und nach den Grenzen der Rentabilität und Ausführbarkeit der Flugbewegung für den Thierkörper.

I.

Die Form der Bewegung.

A. Disposition der Maschine.

Die beste Vorbereitung zum Studium der Form der Bewegung ist zweifelsohne die anatomische Untersuchung. Sie unterrichtet uns nicht bloss über die geometrischen Verhältnisse des Körpers in einer bestimmten Stellung, derjenigen, welche das todte Thier einnimmt, sondern giebt zugleich Aufschluss über die Materialen der Theile, über eine ganze Reihe physikalischer Eigenschaften derselben, über die Verschiebungsmöglichkeiten bei der Einwirkung bestimmter supponirter Kräfte und s. f.

Wer sich irgendwie mit den Verhältnissen der Flugbewegung vertraut machen will, und gerade am meisten derjenige, dem anatomische Studien im Uebrigen fremd sind, sollte es nicht unterlassen, Vogelkörper zu zergliedern oder gute, von andern gefertigte frische Präparate zu untersuchen, wobei die verschiedensten Lehrbücher der Zoologie und vergleichenden Anatomie allen wünschenswerthen Aufschluss über die übliche Benennung der Theile und über die Bedeutung derselben zu geben vermögen.

Ich will den vorhandenen Beschreibungen keine irgendwie vollständige, neue hinzufügen, sondern auf den Bau des Vogelkörpers nur soweit eintreten, als die anatomischen Verhältnisse für die zu besprechenden Fragen jeweilen von Bedeutung sind.

Die für den normalen und horizontalen Flug bedeutsamste Massengliederung des Vogelkörpers ist diejenige in die beiden Flügel und den ganzen übrigen Rest der Körpermasse.

Der Rumpf ist länglich, von rundlichem Querschnitt. Das beim Flug hinten liegende Ende ist verschmälert (und zwar von oben nach unten meist weniger als von einer Seite zur andern) und läuft in den Schwanz aus, der mit seinen Federn eine annähernd horizontal gestellte Platte darstellt. Vorn geht der Rumpf unter allseitig gleichmässiger Verschmälerung in den Hals über, dieser in den wenig dickeren, meist kleinen Kopf, der zuge-

spitzt im Schnabel endet und mit diesem voran zuerst die Luft durchschneidet.

Zu diesem Stammtheil des Körpers kommen noch die hinteren Extremitäten hinzu.

Diese ganze Masse, mit Einschluss des Federkleides und der am Schultergelenk liegenden mächtigen Muskeln ändert ihre Configuration beim horizontalen Fluge im ganzen wenig und kann als die eine Partialmasse des Systems aufgefasst werden, die wir in Zukunft einfach als Rumpf oder mit dem Buchstaben *R* bezeichnen wollen.

Die beiden andern Partialmassen, symmetrisch zur Symmetrieebene des Rumpfes gestellt und organisirt, sind in Längslinien an die mächtigste Stelle des Rumpfes nah dem oberen Rande seiner Seitenflächen eingepflanzt.

Die hauptsächlichsten Theile der Verbindung sind:

1) Die Verbindung des Skeletes des Flügels mit dem Skelet des Rumpfes in dem Schultergelenke. Eine Gelenkspalte trennt das Oberarmbein (Humerus), dessen Rumpfende einen von vorn nach hinten abgeplatteten Gelenkkopf darstellt, von der sattelförmigen Gelenkpfanne, welche vom Skelet des Rumpfes gebildet wird. Eine Gelenkkapsel verbindet die aneinander stossenden Knochen, so dass die Bewegung des Flügels gegenüber dem Rumpfe innerhalb des gewöhnlich benutzten Excursionsgebietes ohne erhebliche Reibung vor sich gehen kann, aber natürlich nur annähernd als eine Drehbewegung, um irgend eine nahe an der Gelenkspalte vorbeiziehende Drehungsaxe.

2) Die Muskeln, welche am Schultergelenk vorbeiziehen und sich der Hauptmasse nach einerseits am Skelet des Rumpfes, andererseits am Humerus in der Nähe des Schultergelenkes befestigen und sich demnach wesentlich den übrigen Theilen des Rumpfes anschmiegen, während nur ein kleiner Theil dem Humerus entlang läuft und sich entfernter vom Gelenk, ja selbst jenseits des Ellenbogengelenkes an den Vorderarmknochen anheftet. Die Concentration der Muskelmassen auf den Rumpf hat zur Folge, dass bei den Bewegungen des Flügels ein möglichst kleiner Bruchtheil der beschleunigenden Kraft auf die Mitbewegung der Muskeln des Schultergelenkes, beziehungsweise auf die Hemmung und Umkehr ihrer Bewegung verwendet werden muss. Was aber die Wirkung der Schwere auf diese Muskeln betrifft, so vertheilt sich natürlich die Last der Muskeln in jedem Augenblick nach einem ganz bestimmten Verhältnisse auf die

beiden Ansatzpunkte am Skelet. Der Hauptantheil ihrer Last wird von dem Skelet des Rumpfes getragen.

3) Die Haut mit ihrem Federkleide geht continuirlich vom Rumpf auf den Flügel hinüber und ist an der hinteren Seite des Schultergelenkes zu einer Falte ausgezogen (hintere Flughaut mit Deckfedern). Auch bei diesen Theilen muss ein bestimmter Bruchtheil der Masse und des Gewichtes dem Rumpfe, der Rest dem Flügel zugerechnet werden. Für jede neue Stellung des Flügels zum Rumpf ist diese Vertheilung eine etwas verschiedene; doch begeht man keinen grossen Fehler, wenn man die Masse der Muskeln und äusseren Bedeckungen von ganz bestimmten, ein für alle mal bezeichneten Querschnitten an auf der einen Seite mit zu der Partialmasse des Flügels, auf der andern zu derjenigen des Rumpfes hinzurechnet.

Das **Skelet des Rumpfes** besteht zunächst aus einem fast vollkommen starren Abschnitte *K* (Fig. 5), den ich als Kasten bezeichnen möchte; an ihm entspringen sämmtliche Muskeln des Schultergelenkes (mit Ausnahme einiger Hautmuskeln und des dünnen M. latissimus dorsi). Dieser Kasten wird gebildet von dem Brustbein *st*, den beiden Coracoid-Beinen *c*, den Schulterblättern *sc* und dem Gabelknochen *f*. Die Wirbelsäule mit dem Becken und Schädel bildet einen zweiten Bestandtheil des Rumpfskeletes, der gegen den Hals zu bis zum Kopf und ebenso am hintersten Ende im Bereiche des Schwanzes biegsam und beweglich, im Becken- Bauch- und Brusttheil aber annähernd starr ist und durch die dünnen Rippen wie mit einer grossen Zahl von Beinpaaren auf dem Rande des Brustbeins elastisch und in einer durch Muskeln regulirbaren Stellung aufruht. Die Last der Eingeweide wird zum grösseren Theile — und dies gilt namentlich für das Herz, die Leber, den Magen und einen Theil der Gedärme, — direkt durch den Kasten getragen, und nur ein kleinerer Theil derselben ist an Wirbelsäule und Becken aufgehängt.

Der Schwerpunkt des ganzen Rumpfes liegt wegen der tiefen Lage der mächtigsten Schultergelenkmuskeln unterhalb der Mittellinie des Rumpfes oder Brustkorbes ziemlich weit nach unten und auch ein Stück nach hinten von den Schultergelenken.

Weniger starr und unverändert in seiner Configuration bleibt beim horizontalen Normalfluge der **Flügel.** Es ist bekannt, wie dieses flächenhaft ausgebreitete Gebilde durch ein gegliedertes **Skelet** gestützt ist (siehe Fig. 5), welches dem Skelet der vorderen Extremität der Amphibien, Reptilien und Säugethiere ver-

gleichbar ist und vor allem zwei Hauptgliederungsstellen, das Ellbogen- und das Handgelenk (*E* und *H*) aufweist. Auch bei stärkster Streckung sind die 3 Hauptabschnitte des Skeletes, der

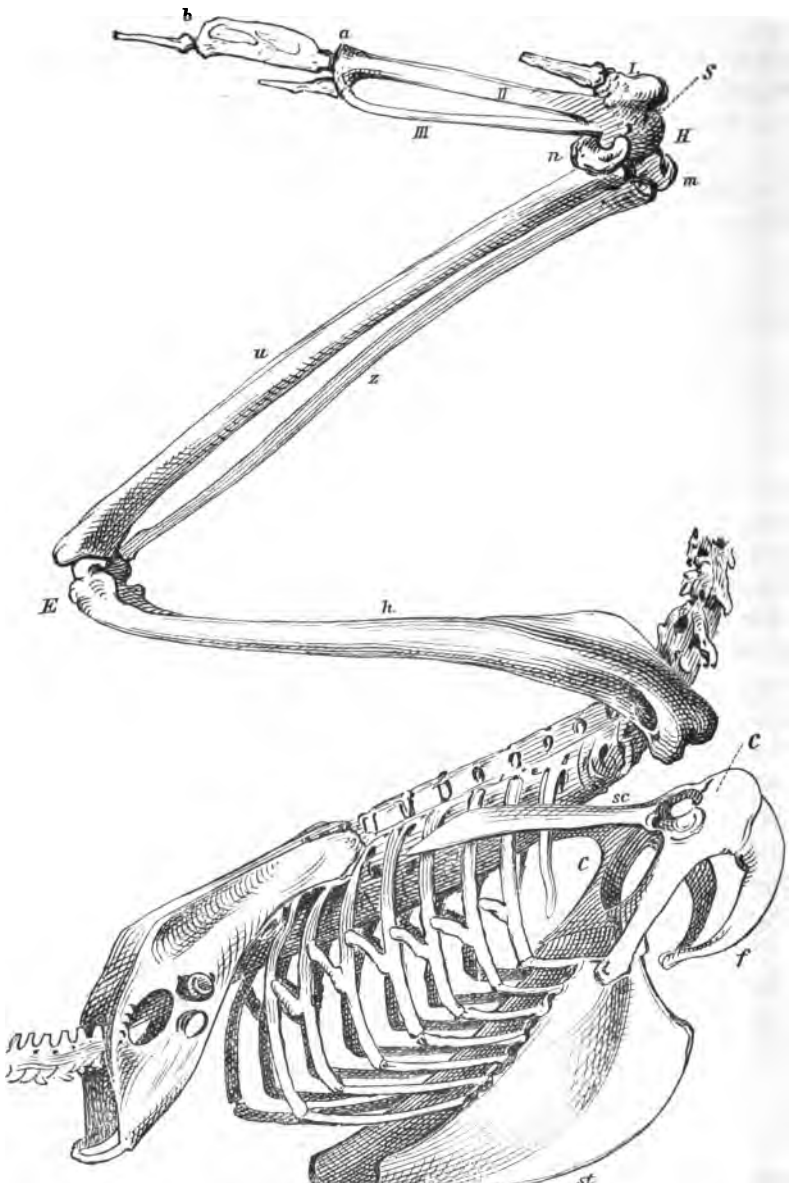


Fig. 5. Rumpf- und Flügelskelet eines Adlers.

Humerus *h*, die Vorderarmknochen *r* und *u* und das Handskelet noch im Winkel zu einander gestellt, so dass die Convexität des Ellbogens am natürlich horizontal zur Seite ausgestreckten Flügel nach hinten, diejenige des Handgelenkes nach vorn sieht. Die Wirkung der im Flügel selbst gelegenen Muskeln dieser Gelenke dient dazu, diese Knickungen nach Belieben zu verschärfen (Beugung des Ellbogen- und Handgelenkes).

Das Handskelet besteht aus einer verhältnissmässig geringen Zahl knöcherner Stücke. Auf die Vorderarmknochen folgt zunächst eine in der Ebene des Flügels liegende Knochenscheibe *s* (mittlere Elemente der 1. und sämmtliche Stücke der 2. Handwurzelreihe). Am vorderen und hinteren Rande ihrer Gelenkverbindung mit den Vorderarmknochen ist je ein rundliches kleines Knochenstück eingefügt (Randtheile der 1. Handwurzelreihe, Fig. 5 *m* und *n*). Die Scheibe selbst läuft distal in 3 Fortsätze aus (1., 2., und 3. Metacarpus, mit I, II und III bez.). Der vordere ist ganz kurz; ihm sitzt das dolchartige Glied auf, das den Lenkfittich trägt und als erste und einzige Phalanx des Daumens gedeutet werden muss; die beiden hinteren Fortsätze (2. u. 3. Metacarpus) ragen viel weiter hinaus und sind an ihren Enden mit einander verschmolzen, so dass ein länglicher Rahmen gebildet wird. Dem Ende des Rahmens aber sitzen ein hinteres kleines stiletförmiges Knöchelchen (das Kleinfingerglied) und ein längeres messerartiges vorderes Stück (die 1. Phalanx des Mittelfingers) auf, welch letzteres seinerseits wieder das Endglied des Flügels (eine 2. Phalanx des Mittelfingers) trägt.

Am Rücken des Endgliedes ist die erste, an dem messerartigen Stück die 2. und 3., an dem Kleinfingerglied die 4. Schwungfeder befestigt.

So zerfällt also das Skelet der Hand der Hauptsache nach durch 2 transversale Gliederungsstellen (bei *a* und *b*) in drei, gegen die Flügelspitze hin an Grösse abnehmende Längsabschnitte. Es ist nur einer geringen Durchbiegung über die Kanten und über die Fläche und nur einer geringen Längstorsion fähig. Ziemlich gross ist noch die Abbiegungsmöglichkeit für das Endglied, welches die 1. Schwungfeder trägt. Weitaus die grösste Beweglichkeit aber kommt dem Lenkfittich zu, der vom vorderen Rand der Schwinge abgegliedert ist.

Die im Flügel gelegenen Muskeln schmiegen sich den Knochen an und liegen z. Th. in den Spatia interossea.

Eine erste Verbreiterung der Flügelfläche kommt durch die

beiden Hautfalten, die sich hinten am Schultergelenk und vorn am Ellbogengelenk ausspannen (hintere und vordere Flughaut) zu Stande. Die Hauptsache aber bleibt in dieser Beziehung den Federn überlassen.

Die **Verhältnisse der Federbekleidung** müssen von vornherein von uns genauer ins Auge gefasst werden. Wir folgen dabei hauptsächlich der ausgezeichneten Beschreibung, welche PRECHTL von den Flugorganen der Vögel gegeben hat[1]), und lassen ihn z. Th. selbst sprechen.

Auf den Knochen des Armes sind, theils recht-, theils schiefwinklig die grossen Contourfedern (sog. Schwungfedern, Remiges der Autoren) aufgelegt, welche, indem sie von innen nach aussen über einander greifen und sich decken (der äussere Rand einer Feder deckt jeweilen den inneren Rand der nächst äusseren Feder), eine elastische Fläche des Flügels bilden, wie sie bei den fliegenden Insekten durch die zwischen feinen „Adern" ausgespannte Membran, oder bei der Fledermaus durch eine sehnige Haut gegeben ist.

Der Flügel theilt sich der Länge nach in drei Regionen:

1) Den Deckfittich[2]), welcher unmittelbar am Leibe oder Rumpfe des Vogels liegt, und dessen Federn, die sog. Schulterfedern auf der die Muskeln des Oberarms umkleidenden Haut liegen und durch die hintere Flughaut in ihrer Lage erhalten werden.

2) Den Fächer, welchem die Federn zugehören, die im Bereiche des Vorderarms liegen. Die grossen Federn des Fächers, welche nur vorn von kleineren Federn, sog. Deckfedern, bedeckt sind und den hinteren Rand des Fächers allein bilden, werden von den Ornithologen gewöhnlich als Schwungfedern zweiter Ordnung bezeichnet. Sie sind in den hinteren Rand der dorsalen Hautplatte des Flügels in regelmässigen Abständen mit ihren Spulen eingepflanzt und mit dem Periost der Rückenfläche der Ulna innig verbunden.

3) Die Schwinge; ihre grossen Federn, von den Ornithologen gewöhnlich als Schwungfedern erster Ordnung, von uns mit PRECHTL einfach als Schwungfedern bezeichnet, verhalten sich ähnlich zu der Haut und den Knochen der Hand wie die grossen

---

[1]) PRECHTL, Untersuchungen über den Flug der Vögel. Wien, 1846.

[2]) Schulterfittich, Perapterum.

Fächerfedern zu den entsprechenden Theilen des Vorderarms, nur sitzen sie zur Längsaxe der Hand nach aussen zu immer mehr schiefwinklig auf. Ihre Zahl ist nach PRECHTL bei allen Fliegern constant 10; die 4. Schwungfeder, von der Flügelspitze aus gezählt, ist dem Endgliede des kleinen Fingers der Länge nach aufgelegt, die 1. Schwungfeder ebenso dem Endgliede des Mittelfingers (Lenkfeder), die 2. u. 3. auf dem Knochen des ersten Gliedes des grossen Fingers; die 6 inneren auf den Knochen der Mittelhand.

„Die Spulen dieser Federn liegen, ausser ihrer Befestigung an dem Knochen, unter einander in der elastischen und sehnigen Hautduplicatur verbunden, welche eine ununterbrochene Fortsetzung der die Fächerfedern verbindenden Haut ist, nur ist diese Verbindung hier stärker und das Ende der Haut bildet einen sehnenartigen, die Spulen umgebenden Umschlag.

Auf die Federn des Mittelhandknochens und die sie verbindende Haut wirken ebenfalls, wie vorher bei dem Fächer, einzelne von dem Antagonisten des Streckers des grossen Fingers auslaufende Sehnen, die ihre Nieder- und Festhaltung befördern.

Bei der Streckung des grossen Fingers breiten sich die 5—6 ersten Schwungfedern auseinander nach vorwärts, bei seiner Beugung schieben sie sich untereinander und rückwärts, so dass die Enden der Fahnen sich decken; bei der Beugung der Mittelhand und bleibender Streckung des grossen Fingers bleiben die äusseren Schwungfedern ausgebreitet, es kann aber auch noch der grosse Finger sich beugen, wobei denn alle Schwungfedern sich zusammen schieben. Die Schwinge schiebt sich aber zum Theil unter den Fächer, wodurch der Flügel verkürzt wird. Wird der Flügel endlich ganz eingezogen, nämlich durch Anziehung des Oberarms, des Vorderarms und der Hand, so schiebt sich die Schwinge unter den Fächer und der Fächer unter den Deckfittich, der dann als ein Theil des befiederten Körpers erscheint.

Die auf dem zweiten Gliede des grossen Fingers befestigte Lenkfeder ist mit dem letzteren selbst für sich nach vor- und rückwärts beweglich. Die Biegung der Schwung- und Fächerfedern nach unten giebt der unteren Flügelfläche eine nach aussen und hinten gewölbte Form."

4) Endlich sind an dem Daumenknochen drei bis vier kürzere, in der Länge abnehmende, ziemlich steife und gekrümmte Federn befestigt, die einen kleinen, mit dem Daumen nach vor- und rück-

wärts, doch auch dorsal- und ventralwärts beweglichen und um die Längsaxe drehbaren Fittich bilden, welcher seiner Bestimmung nach, wie PRECHTL meint, am besten als Lenkfittich [1]) bezeichnet wird.

Die aus hornartiger Substanz gebildeten Federn sind als Bestandtheile zur Bildung einer elastischen, der Luft undurchdringlichen Fläche sehr vollkommen eingerichtet. Jede Feder besteht aus dem Kiel und der Fahne. Der Kiel, welcher den festen elastischen Stamm bildet, an dessen äusserem Theile zu beiden Seiten die Fahne anliegt, theilt sich in die Spule und den Schaft. Die Spule ist der cylindrische, aus durchsichtiger Substanz gebildete Theil, mit welchem die Feder in dem Flügel befestigt ist; von dem Ende dieser Röhre beginnt der Schaft, indem die Substanz derselben bis zur Spitze des Kiels fortläuft und eine weisse markige Substanz umschliesst, welche die Masse des im Querschnitte ein Viereck bildenden Schaftes ausmacht. Die untere Seite ist in der Mitte der Länge nach von einer Rinne durchzogen, welche zwei mit den beiden Seitenwänden verbundene Leisten trennt, durch deren Gegenwirkung gegen die obere elastische Decke des Schaftes die Festigkeit des Schaftes gegenüber auf- und abwärtsbiegenden Einflüssen gesichert wird. An beiden Seiten des Schaftes, nahe seiner oberen Peripherie, ist die Fahne eingesetzt, welche aus 2 Bärten besteht. Jeder Bart setzt sich aus einzelnen nahe an einander liegenden Strahlen zusammen, welche im Allgemeinen mit ihren verdünnten Enden etwas gegen die Spitze der Feder hingerichtet sind und aus demselben durchscheinenden Stoffe bestehen wie die Decke des Schaftes und die Spule. An diesen Strahlen unterscheidet man wieder Kiel und Bärte, welche als secundäre Kiele und secundäre Bärte von den primären der ganzen Federn unterschieden werden.

Die Strahlen mit ihren Kielen und Bärten, welche letztere wieder aus einzelnen (secundären) Strahlen bestehen, die etwas gegen die Spitze der primären Strahlen hingerichtet sind, sehen ganz ähnlich aus wie die ganzen Federn, namentlich an denjenigen Stellen, wo die ganze Feder weich und dünn ist, weil hier die secundären Kiele nur wenig über die Fläche der secundären Bärte nach unten vorragt. Wo aber der primäre Bart und die primären Strahlen stärker gebaut sind, springen die Kiele der letzteren als blattartige Leisten nach unten vor, so dass hier ein pri-

[1]) Afterflügel, Alula.

märer Federbart, von unten mit der Loupe betrachtet, an die Unterfläche eines Blätterpilzes gemahnt. Diese blattartigen Leisten lassen schmale Räume zwischen sich, welche nach unten offen und von oben her durch die secundären Bärte luftdicht zugedeckt sind.

Unsere Fig. 6 zeigt ein Stück eines primären Federbartes senkrecht zur Fläche, parallel der Längsaxe der Feder geschnitten. Und zwar hat man sich bei *S* die Spitze, bei *B* die Basis der ganzen Feder zu denken. *abc* sind die quer getroffenen secundären Kiele, *bd* und *ce* die quergetroffenen secundären Bärte (oder einzelne längs getroffene secundäre Strahlen).

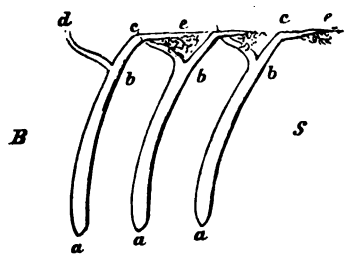


Fig. 6.

Die secundären Bärte liegen wesentlich in der oberen Peripherie der Feder; der hintere (*ce*) geht annähernd vom oberen Rande des secundären Kieles ab, der vordere (*bd*) etwas tiefer. Die Leisten, welche als secundäre Kiele bezeichnet werden (*abc*), sind, wie man sieht, etwas convex nach der Basis der ganzen Feder zu gekrümmt.

Der hintere Bart eines Strahles legt sich über den vorderen des nach hinten fallenden Strahles. Die Strahlen zeigen sich also besser geeignet, einem etwas nach vorn gegen die Basis der Feder wirkenden abbiegenden Einfluss zu widerstehen, als einem von ihrer Vorderfläche her einwirkenden; und die Bärte zweier benachbarter Strahlen sind so übereinandergefügt, dass sie sich bei der Aufbiegung der Federn gegenüber ihren vorderen gefestigten Theilen, wie sie die Folge eines von unten einwirkenden Luftwiderstandes ist, inniger aufeinander legen. Die benachbarten secundären Bärte sind aber ausserdem noch in kunstvoller Weise mit einander verfilzt. Die Bartstrahlen der vorderen secundären Bärte *bd* liegen steif und dicht nebeneinander und laufen in ziemlich kurze hackenförmige Haarzipfel (tertiäre Strahlen) aus. Aehnlich steif und dicht sind die Strahlen der hinteren secundären Bärte nur an ihrer Basis, dann aber laufen sie in lange feine Haare aus (Fig 6 rechts bei *e*), deren Länge übrigens verschieden ist und die oft einen etwas gewundenen Verlauf haben; andere, noch stärker gekrauste Haarzipfel (tertiäre Strahlen) wenden sich

mehr nach unten und bilden gleichsam einen wolligen Saum, in den die vorderen secundären Strahlen des nächst hinteren primären Strahles von unten her im Ganzen und mit ihren hackenartigen tertiären Strahlen eingebettet sind.

Dieser Zusammenhang wird gewaltsam gelöst (unter Zerreissung einzelner Fäserchen), wenn man die Strahlen einer Federfahne aus einander spaltet, und stellt sich nicht sofort in derselben Vollkommenheit wieder her.

„Die vordere Region der Flügelfläche, wo die grossen Federn mit ihren Kielen auf den Armknochen liegen, ist mit kürzeren übereinanderliegenden Federn bedeckt, welche Deckfedern (tectrices) heissen und sowohl zur Verschliessung der Oeffnungen dienen, welche die Kiele jener Federn zwischen sich lassen, als auch zur Verstärkung der Auflage der letzteren selbst. Die ersten oder längeren Deckfedern liegen mit dem Ende ihrer Spule unmittelbar neben der Spule der Fächerfeder und überkreuzen dann die letztere, indem sie mit ihr häutig verbunden sind. Die Spulen der Deckfedern der Schwinge liegen unmittelbar der Länge nach auf den Spulen der Schwungfeder, mit denen sie gleichfalls häutig fest verbunden sind. Die Spulen dieser Federn sind viel stärker als jene der Deckfedern des Fächers, ja im Verhältniss zur Länge ihrer Fahne noch stärker als die Spulen der Schwungfedern selbst und verstärken daher bedeutend die Auflage der Schwungfedern. Die Länge dieser ersten Deckfedern, die übrigens jenen des Fächers analog geformt sind, ist bei verschiedenen Flügeln verschieden, je nachdem eine grössere Steifheit dieser Fläche erfordert wird. Gewöhnlich macht ihre Länge $^1|_3$ bis zur Hälfte der Flügelbreite aus. Ueber diesen ersten Deckfedern liegen gewöhnlich noch zwei Reihen kürzerer, dann noch kleinere und kürzere, die am vorderen Flügelrande sehr klein werden und einen sammtartigen Wulst bilden. Die basalen Enden aller dieser Federn sind mit Flaumfedern bedeckt, so dass eine vollkommen geschlossene Fläche erhalten wird. Uebrigens nimmt die Stärke aller Federn des Flügels, der Fächerfedern, Schwungfedern und Deckfedern von innen nach aussen zu, sowohl durch die Stärke des Kiels, als die Stärke der Fahne, bis endlich an den äussersten Schwungfedern, auf welche beim Niederschlage des Flügels die grössere, dem Quadrate der Geschwindigkeit proportionale Kraft wirkt, das Maximum dieser Stärke auftritt. Die Deckfedern der unteren Flügelfläche sind im Ganzen bedeutend schwächer als die oberen, auch weit weniger zahlreich.“

Beeinflussung der Form des Flügels durch äussere und innere Kräfte.

Es ist wichtig, hervorzuheben, dass die auf oben erwähnte Weise fast continuirlich und luftdicht gemachte dorsale Schicht der Federfahne den Charakter einer continuirlichen Platte oder Membran behält, mag nun ein stärkerer Ueberdruck der Luft auf die obere oder auf die untere Seite, auf die näher an der Basis oder auf die näher der Spitze der Feder gelegenen Theile der Fahne einwirken. Es ist also nicht die Verbindung der einzelnen Federtheile, speciell der Federstrahlen eine ventilartige, je nach Umständen geschlossene oder aufgehobene. Immerhin zeigt sich die Festigkeit des Verschlusses wie auch der Widerstand der ganzen Feder und ihrer primären Strahlen besonders gross gegenüber einem von unten her auf die Feder einwirkenden Drucke.

So stellt auch der Flügel im Ganzen im Bereiche des Dickfittichs und in der vorderen Region von Fächer und Schwinge eine vollsändig luftdicht geschlossene Platte dar, sowohl gegenüber einem Ueberdrucke der Luft an der oberen als gegenüber einem solchen an der unteren Fläche des Flügels.

Anders verhält sich dagegen die Gegend, welche den von Deckfedern freigelassenen Abschnitten der Schwung- und Fächerfedern entspricht. Hier sind die beiden Federbärte der grossen Federn deutlich, wenn auch nicht überall in demselben Masse ungleich breit; der äussere ist jeweilen der schmälere und auch aus steiferen Strahlen gebildete; ferner bleibt ein grösserer oder geringerer Theil von der Spitze jeder Feder vollständig isolirt. Auch wenn der Ueberdruck der Luft gleichmässig auf die Unterfläche des ausgebreiteten Flügels vertheilt ist, müssen die breiten Bärte stärker nach oben abgebogen werden als die schmalen, bis sie sich jeweilen dicht an die Unterfläche der nächst inneren Feder (soweit sie unter derselben liegen) anpressen.

Letzteres muss um so mehr der Fall sein, je mehr der Ueberdruck an der Flügelunterseite von Feder zu Feder gegen die Spitze des Flügels hin pro Flächenelement zunimmt, wie solches in Wirklichkeit in der Regel der Fall ist. Die Zunahme der Festigkeit der Federkiele und ihrer Strahlen nach der Spitze des Flügels hin und die grössere Länge der Federn, diese beiden

Momente stehen offenbar mit einander in einem derartig regulirten Verhältniss, dass trotz der Zunahme des grösseren Ueberdrucks der Luft an der Unterseite der Flügelspitze doch die Durchbiegung der Flügelfläche beim Niederschlage des Flügels das Material der Federn überall in gleichmässiger Weise in Anspruch nimmt und dass der Schluss der Federn gegeneinander überall in ähnlicher Weise sich vollzieht. Für besondere Ansprüche sind ausserdem besondere, durch Muskeln beeinflusste Mechanismen vorhanden, durch welche die Stellung einzelner Federn oder Flügeltheile regulirt werden kann; diese Vorrichtungen sind besonders von PRECHTL genauer studirt worden.

Es erhebt sich nun die Frage, ob nicht dieselben Verhältnisse, welche den Anschluss der in einfacher Reihe stehenden grossen Federn aneinander bei einem auf die Unterseite des Flügels wirkenden Ueberdrucke der Luft sichern, umgekehrt ein Auseinanderklaffen dieser Federn begünstigen für den Fall, wo der Flügel mit der oberen Seite voran gegen die Luft geht. Es handelt sich dabei nicht um die freien Enden der Federn, sondern um die Stellen, wo sie sich, wie die parallelen Plättchen eines Fensterladens, mehr oder weniger decken.

So viel ist sicher, dass durch Dorsalwärtsaufbiegung der äusseren Theile des Skeletes gegenüber den inneren, wobei die Kiele der äusseren Federn gegenüber den inneren gehoben werden, der Anschluss der Federn aneinander wieder hergestellt werden kann, auch wenn die äusseren Federn durch den Ueberdruck der Luft stärker nach unten gedrängt werden sollten und der Innenrand jeder Federfahne stärker als der Aussenrand. Wenn dagegen die äusseren Enden des Flügelskelets und die äusseren Schwungfedern mit ihren Kielen nicht durch Muskelkräfte nach oben, vielmehr in Folge des dorsalen Luftwiderstandes, der namentlich an der Spitze des Flügels gross ist, stärker nach unten gegenüber der Ebene des Fächers hinausgetrieben werden, dann muss ein Klaffen der grossen Feder stattfinden; die Luft dringt von oben in die Zwischenräume ein und drängt den inneren Bart der Fahne noch um so stärker abwärts, je grösser er im Vergleich zum vorderen Barte ist, dreht also die Ebene der Fahne und vermehrt auf diese Weise den senkrechten Abstand der Federflächen.

Die Asymmetrie der Bärte der äusseren grossen Federn würde also bewirken können, dass selbst bei Ventralbeugung der Spitzen des Flügelskeletes doch noch die Federbärte sich aneinanderlegen, wenn ein

Luftüberdruck von unten wirkt, dagegen bei derselben Stellung des Skeletes wie die Platten einer Jalousie aufklaffen müssen, sobald der Flügel mit der Dorsalseite voran gegen die Luft geht. Es ist aber denkbar, dass durch Muskelwirkung, welche die Befestigungspunkte der äusseren Schwungfedern oder ihre Kiele nach oben zieht, oder die Spulen dreht, oder dass durch grössere oder geringere Zusammenschiebung der Fächer- und Schwungfedern je nach Bedarf ein solches Klaffen verhindert werden, oder dass es von vornherein wegen der Steifheit des Flügels in nur unbedeutendem Grade stattfinden kann.

Die Form des Flügels und die Stellung seiner verschiedenen Flächen kann, wie man sieht, eine recht verschiedene sein, auch wenn Schulter-, Ellbogen-, Handgelenk und Flügelspitze dieselbe relative Lage zueinander und zum Rumpf haben, je nach den Luftwiderständen und je nach der Betheiligung der im Flügel selbst gelegenen Muskeln.

Ich halte es für gerechfertigt, diesen Verhältnissen noch einige weitere Betrachtungen zu widmen.

Bringt man einen todten Vogel, eine Taube, einen Bussard, einen Storch mit dem Rumpf in die Stellung, welche er beim Flug einnimmt und breitet die Flügel möglichst aus, so spannt sich die vordere Flughaut (Fig. 7 *oec*) in einer Ebene aus, welche

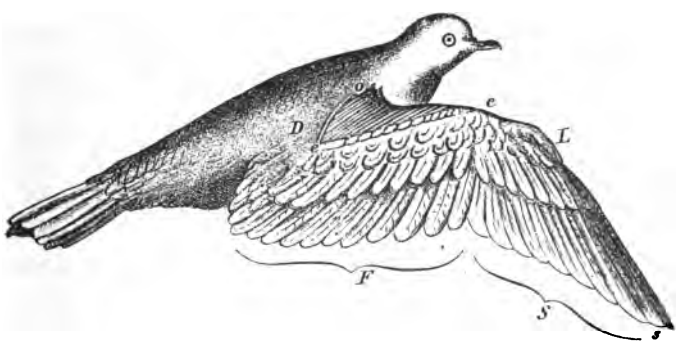


Fig. 7.

die obere Peripherie des Humerus und des Radius berührt, und bildet das sog. voderere Flügeldreieck. Die Sagittallinien auf derselben liegen etwa horizontal oder vielleicht der Längsaxe des Rumpfes parallel. (Der ganze Körper ist in Fig. 7 noch etwas zu stark aufgerichtet).

Die Ulna steht gegenüber diesem dreieckigen Felde etwas tiefer. Die Federn des Deckfittichs, die grossen Federn des Fächers, das Skelet der Hand selbst und die Schwungfedern haben, wenn keine äussere Kraft auf den so gestreckten Flügel einwirkt, ihre Enden merklich tiefer als dieses Feld und bilden eine von dem letzteren aus nach hinten bezw. nach aussen hinten und nach aussen schräg abfallende Fläche.

Der hintere, innere Rand der grossen Contourfedern liegt etwas tiefer als der äussere Rand. Es kann nun in der stärksten Streckstellung des Flügels das Handskelet weder durch die Muskeln des Flügels noch durch die äusseren Kräfte gegenüber den Vorderarmknochen erheblich gehoben oder gesenkt werden, das Handgelenk ist vielmehr gegen dorso-ventrale Einflüsse annähernd festgestellt, ebenso verhält es sich mit dem Ellbogengelenk; wohl aber vermag ein gleichmässig auf die Unterfläche des gestreckten Flügels vertheilter Druck bei fixirtem Humerus (und bei irgendwie bewirkter Feststellung des Flügeldreieckes, der Vorderarmknochen und des Handskeletes) den hinteren Theil des Deckfittichs und die grossen Federn empor zu treiben, so dass der hintere Rand des Flügels mehr in die Fortsetzung der Ebene des vorderen Flügeldreiecks emporgehoben wird, namentlich im Bereiche des äusseren Theiles des Fächers und des inneren Abschnittes der Schwinge; erste und zweite Schwungfeder widerstehen mehr. Der Flügel bekommt dadurch wirklich eine etwas schraubenförmig gewundene Gestalt; die mittleren und äusseren Theile des Flügels sind gegenüber den inneren etwas abgedreht, sodass die Unterfläche direkt nach unten oder sogar nach unten hinten sieht; in noch stärkerem Masse kann Solches an den Flächen der einzelnen frei vorragenden Schwungfedern der Fall sein.

Im Bereiche des vorderen Flügeldreieckes ist dann die untere Flügelfläche fast platt; der vordere Rand springt zwar etwas verdickt nach unten vor, aber es ist nicht wie Prechtl meint der Bereich des ganzen Flügeldreiecks stark gegenüber der übrigen benachbarten Unterfläche des Flügels pronirt, und die Bezeichnung „Windfang“ für dieses Feld erscheint im Hinblick auf sein Verhalten beim Niederschlag nicht berechtigt.

Ist aber die Hand gegenüber dem Vorderarm gebeugt, so wird das Handgelenk für dorso-ventrale Einflüsse locker. Die Hand kann mit ihrer Breitseite voran in erheblichem Maasse hin und herbewegt, auch kann sie um ihre Längsaxe rotirt werden. Als fixirende innere Muskelkräfte gegenüber ventro-dorsal wirken-

den äusseren Kräften können wesentlich nur die drei Vorderarmmuskeln dienen, welche ihre Sehnen unten am Handgelenk vorbei zum vorderen Rande der Hand schicken (der M. flexor carpi radialis zum vorderen Rande der Basis des gemeinschaftlichen Metacarpus, der flexor digit. prof. und der flexor digit. subl. zum vorderen Rande der Gross-Fingerglieder).

Durch die Spannung dieser Muskeln kann wohl der vordere Rand der Hand fixirt und niedergehalten werden, die von unten auf die Schwinge wirkenden äusseren Kräfte werden aber die hinteren Theile der Schwinge gegenüber dem vorderen Rande emporzuheben vermögen, um so mehr, je mehr letzterer selbst durch die Muskeln niedergezogen wird (Pronation).

Beim vollständigen Anlegen der eingezogenen Flügel an den Leib rollt sich die eingezogene Schwinge mit dem radialen Rand voran ventralwärts ein. Der Carpus schiebt sich dicht aussen an der Schulter vorbei in die Höhe, wobei die Vorderarmknochen ihre sonst ventrale Fläche ebenfalls mehr gegen den Leib zu drehen. Der Beginn der Einziehung der Schwinge aber, wenn keine erheblichen äusseren Kräfte wirken ausser der Schwere, scheint am natürlichsten mit einer activen entgegengesetzten (supinatorischen) Längsrollung und zugleich mit einer Senkung der Spitze vor sich zu gehen; dann schiebt sich mit Leichtigkeit die eingezogene Schwinge unter den Fächer und bildet mit ihm einen nach oben offenen Flächenwinkel, dessen Grund nach hinten abfällt. Gesellt sich ein gleichmässig auf die Schwinge vertheilter Druck von oben hinzu, so kann diese Längsrotation erheblich gesteigert werden.

Ein solches Verhalten habe ich bei dem Flügel der verschiedensten Arten constatiren können (Columba, Pica, Corvus, Haematopus, Numenius, Larus, Buteo, Aquila). Wir werden auf diesen Befund bei Gelegenheit zurückkommen.

Die nach unten leistenartig vorspringenden Theile der Federn, der Kiel und die blattartigen Axen der Strahlen müssen aufgefasst werden als Stützbalken für die zarte dorsal gelegene Membran, welche durch die Verbindung der secundären Barte gebildet wird. Als solche sind sie mit der möglichsten Ersparniss an Material gebaut; der Umstand, dass sie aus der zarten Membran nach unten vorragen und nicht nach oben, resp. dass die Membran zwischen den obern und nicht zwischen den unteren Rändern dieses Balkensystems sich

ausdehnt, ist sicher von irgend einer functionellen Bedeutung. Man könnte daran denken, dass durch diese vorspringenden Theile das Ausgleiten der Luft erschwert werden soll.

Es würde danach der Widerstand der Luft auf die Unterseite der Feder sich etwas anders verhalten, als wenn diese Unterfläche vollständig glatt wäre; der Widerstand würde nicht einfach senkrecht zur Fläche gerichtet, also nicht nur vom Druck der ganzen Luftschicht senkrecht zur Federfläche abhängig sein, sondern ausserdem von der Richtung, in welcher die Feder bewegt wird, indem an all den kleinen Leisten diejenigen Seitenflächen, welche bei der Bewegung gegen die Luft vorausgehen, einen grösseren Widerstand erfahren würden, als die Rückseiten.

Es fehlen hierüber genaue Versuche; soweit ich die Saehe verfolgt habe, scheint es mir nicht wahrscheinlich, dass durch die feinen Erhebungen die resultirende Richtung des Widerstandes in irgendwie erheblicher Weise von der zur Fläche senkrechten Richtung abgelenkt und von der Fortbewegungsrichtung der Fläche abhängig gemacht wird.

Ein nicht unwichtiger, wenn auch vielleicht nicht der einzige Vortheil des Umstandes, dass jene Leisten und Balken nach unten statt nach oben vorspringen, ist die leichtere Verschiebbarkeit der Federn gegeneinander. Es kann jede äussere Feder ungehindert mit ihrer glatten oberen Fläche in ihrer ganzen Breite am abwärtsragenden Kiel der nächst inneren Feder hin- und hergleiten. Trüge die äussere Feder ihren Kiel und ihre Leisten oben, und die innere darüber liegende Feder hätte ihre glatte Fläche unten, so würde der vordere Rand der inneren Feder dem inneren Barte der unteren Feder zu dicht anliegen, sich in der Innenkante derselben, wo sie ihn überkreuzt, fangen u. s. w.

B. Gesichtspuncte und Definitionen bei der Untersuchung der Form der Bewegung und der Luftwiderstände.

Man erwartet vielleicht, dass an die Darstellung des Baues der Maschine und der Möglichkeiten ihrer Formveränderung eine Beschreibung der Flugmuskeln, als der hauptsächlichsten inneren

Kraftquellen sich anschliessen werde. Es liegt ja nahe, aus der Disposition und Grösse der Muskeln auf die beim Fluge stattfindenden Bewegungen und die Widerstände derselben zu schliessen, so z. B. aus der besonderen Lage der Hauptmuskeln der Schulter nach unten vom Schultergelenk zu folgern, dass der hauptsächlich wirksame Schlag in besonderer Richtung nach unten geführt und dass der hauptsächlichste locomotorische Widerstand an der unteren Fläche des Flügels entwickelt wird.

Aber derartige Betrachtungen führen zu leicht auf Irrwege. Die einzig sichere Methode der Erforschung der Mechanik des Fluges ist die von uns oben schon angedeutete.

Aus den wirklich beobachteten Bewegungen der Oberflächen des Flugthieres muss auf die Widerstände, von den auf diese Weise erforschten äusseren Kräften und den beobachteten Aenderungen der Bewegung muss auf die inneren Kräfte geschlossen werden. Erst wenn auf diese Weise eine sichere Grundlage gewonnen ist, kann die Untersuchung der im einzelnen Falle zur Disposition stehenden inneren Einrichtungen die weitere Erkenntniss des Wechselspiels der Kräfte fördern.

Wir stellen zunächst einige allgemeine Gesichtspunkte fest, welche bei der Untersuchung der Form der Bewegung und der Wirkungsweise der äuseren Kräfte beobachtet werden müssen, und einigen uns über gewisse Termini technici. Darauf sehen wir uns in der Literatur nach den über die Flugbewegung verbreiteten Ansichten um, bringen eine kleine Zahl eigener Beobachtungen zur Geltung und entwickeln daraus unsere Theorie von dem Spiel der Bewegungen und der Wirkungsweise der äusseren Kräfte bei dem horizontalen normalen Fluge.

Hinsichtlich der Form der Bewegung ist es von der grössten Wichtigkeit, scharf auseinander zu halten die relative Bewegung der Theile zu einander und die absolute Bewegung der Punkte gegenüber dem umgebenden Medium.

Die Stellung und Bewegung der Flügel zum Rumpf wird am besten bestimmt und definirt mit Hülfe von Coordinaten eines Coordinatensystems, dessen Hauptaxen und Hauptebenen senkrecht zu einander stehen und mit dem Rumpfe starr verbunden gedacht sind und dessen Mittelpunkt im Drehpunkt des Schultergelenkes liegt.

Insofern als die Drehbewegungen des Rumpfes parallel seiner

Medianebene im allgemeinen unbedeutend sind, kann man ohne grossen Fehler annehmen, dass die Richtung der Hauptaxen und Hauptebenen mit Bezug auf den umgebenden Raum dieselbe bleibt, und kann dieselbe demnach so auswählen, dass auch die absoluten Bewegungen nach denselben Hauptrichtungen bequem zerlegt werden können.

Die eine Hauptrichtung (quere oder q-Richtung) wird am besten parallel der Verbindungslinie der beiden Schulterdrehpunkte genommen, die zweite parallel der Richtung, in welcher der Vogel seinem Ziele zustrebt (sagittal horizontale, Ziel- oder z-Richtung), die dritte vertical (v-Richtung).

Die 3 Hauptebenen sind dann:

Die Horizontalebene oder qz-Ebene.
Die verticale Querebene oder qv-Ebene.
Die Sagittalebene oder vz-Ebene.

Sind die Drehungen des Rumpfes erheblich, so wird man am besten die Richtungen der Hauptaxen des Coordinatensystems constant zum umgebenden Raum annehmen und sowohl die relativen Bewegungen des Rumpfes als die des Flügels in den 3 Hauptrichtungen des Coordinatensystems, gegenüber dem Mittelpunkt desselben, dem Gelenkdrehpunkt, bestimmen.

Die Bewegungen einzeler markirter Punkte des Flugthieres lassen sich am besten und einfachsten, bei Beobachtung ohne besondere Hülfsapparate, in folgender Weise beurtheilen:

1) An einem Vogel, der in gerader horizontaler Richtung vom Auge weg oder auf dasselbe zufliegt, sieht der Beobachter nur die Bewegungen in verticaler und in horizontaler querer Richtung. (Projektion der Bewegung auf die Querebene).
2) An einem Vogel, den man direkt von oben, oder direkt von unten her beim Fluge betrachtet, erkennt man die horizontalen (queren und sagittalen) Bewegungen, die verticale Bewegung dagegen nicht. (Projektion der Bewegung auf die Horizontalebene).
3) An einem Vogel, den man genau von der Seite her betrachtet, zeigen sich die sagittalen (verticalen und horizontalen) Bewegungen rein, und die quere horizontale Bewegung verschwindet. (Projektion der Bewegung auf die Sagittalebene).

Zwei dieser Beobachtungsweisen genügen allenfalls zur richtigen Beurtheilung der relativen Bewegung des Flügels.

Es handelt sich dabei vor Allem aus

a) Um die Bewegung der Längslinie des Flügels.

Unter Längslinie des Flügels verstehen wir im Folgenden, bei der Analyse der Kräfte des Fluges die Gerade, welche durch den Gelenkdrehpunkt *o* und den Flügelschwerpunkt *s* geht. Was bei der Beobachtung des fliegenden Thieres als Längslinie erscheint, entspricht nur annähernd dieser theoretischen Längslinie. Durch die oben in No. 1 geschilderte Beobachtungsweise lässt sich die Hebung und Senkung der Längslinie bestimmen, genau genommen die Hebung und Senkung der Projection der Flügellängslinie auf die *qv*-Ebene, der Betrag ihrer Erhebung über die Horizontale (oder Horizontalebene) und das Maximum der Senkung unter dieselbe; der ganze Winkel, den sie in der *qv*-Ebene zu beschreiben scheint, soll hinfort als verticaler Schlagwinkel bezeichnet werden.

Bei der Ansicht von oben oder unten kann der Grad der Vor- oder Rückführung der Längslinie des Flügels und der horizontale Schlagwinkel, der von der Projection der Längslinie in der *qz*-Ebene beschrieben wird, beurtheilt werden; es ist auch zu ermitteln, welcher Antheil dieses Winkels vor, welcher hinter der *qv*-Ebene durch *o* liegt.

Ausserordentlich werthvoll sind sodann Beobachtungen über die Häufigkeit des Flügelschlages pro Secunde und über das zeitliche Verhältniss der Hin- und Herbewegung. Die Zeit einer Periode soll mit *T*, die Zahl der Flügelschläge mit *n* bezeichnet werden.

Die Betrachtung des fliegenden Thieres genau von der Seite giebt wichtigen Aufschluss über die Art, in welcher sich die *z*-Componenten der horizontalen Bewegungen und die *v*-Componenten der queren mit einander combiniren.

b. Die Kenntniss der Bewegung der Flügellängslinie genügt aber nicht zur Beurtheilung der relativen Bewegung des Flügels; es ist nöthig, auch noch die jeweilige Lage eines ausserhalb der Längslinie gelegenen Punktes zu kennen. Dadurch erst wird bestimmt, mit welcher der unzähligen Ebenen, welche durch die Flügellängslinie gelegt werden können, die Flügelfläche im Grossen und Ganzen parallel läuft. Für die Beurtheilung des Luftwiderstandes an irgend einer Fläche des Flügels ist es besonders wichtig, die Richtung einer senkrecht zu dieser Fläche gestellten Linie (Normale zu dieser Fläche) zu kennen.

Es ist nun aber kaum möglich, die Richtung einer solchen

Normalen durch direkte Beobachtung zu beurtheilen; und auch die Richtung irgend einer Linie in der Flügelfläche selbst, welche sich mit der Flügellängslinie unter einem ganz bestimmten constanten Winkel schneidet, ändert sich in einer viel zu complicirten Weise, als dass man sie durch Beobachtung genau verfolgen könnte. Wohl aber gelingt es, die Richtung gewisser Linien der Flügelflächen zu bestimmen, welche zwar ihren Winkel zur Flügellängslinie von Moment zu Moment ändern, aber doch in Wirklichkeit niemals mit ihr zusammenfallen; die Kenntniss ihrer Richtung und derjenigen einer Längslinie des Flächenstückes, die zur Flügellängslinie parallel oder doch möglichst parallel und ein für alle mal hinsichtlich ihrer Lage zu dieser bekannt ist, genügt dann zur Beurtheilung der Richtung des Flächenstückes.

Es handelt sich zum ersten um diejenige Linie des Flächenstückes, in welcher dieses von einer Sagittalebene geschnitten wird, um das sogenannte Sagittalprofil des Flächenstückes. Man kann auf diese Weise die Richtung der einzelnen Theile der Flügelfläche direkt bestimmen, oder aber man fasst die Ebene ins Auge, welche am besten mit der Ausbreitung des Flügels zusammenfällt, und bestimmt nach ihr diejenige der Einzelstücke, wenn deren Lage zur Hauptebene des Flügels bekannt ist.

Ueber die Richtung der Sagittalprofile der einzelnen Abschnitte des Flügels kann man bei der Betrachtung des Vogels von der Seite her in der allergröbsten Weise sich täuschen. Dagegen gewinnt man werthvolle Aufschlüsse, wenn man in einer Sagittalebene des Vogels steht, diesen also von unten, oder von hinten, oben oder vorn her beobachtet (s. o. pg. 38).

Man kann dann leicht ermessen, welche Punkte des Flügels in derselben Sagittalebene liegen (demselben Sagittalprofil angehören) und ob die vorderen Punkte höher oder tiefer liegen als die hinteren u. s. w.

Wir bezeichnen im Folgenden ein Flächenstück des Flügels oder die ganze Fläche des Flügels als pronirt, wenn das vordere Ende des Sagittalprofiles tiefer liegt, als das hintere, als supinirt dagegen, wenn das Gegentheil der Fall ist. Den nach vorn offenen Winkel, welchen das Sagittalprofil mit der z-Richtung bildet, bezeichnen wir als Pronationswinkel (k) resp. als Supinationswinkel (γ).

Umstellung des Flügels im Sinne der Verkleinerung von γ oder der Vergrösserung von k soll Pronation, die entgegengesetzte Supination genannt werden. Doch bemerke ich ausdrücklich,

dass diese Begriffe sich nicht unter allen Umständen und vollkommen mit dem decken, was unter einer Drehung des Flügels um seine Längslinie verstanden wird.

Für eine solche Drehung verwenden wir daher, wo auf die Unterscheidung Gewicht gelegt werden muss, die Bezeichnungen „Aufwärts- und Abwärtsrollung", wobei natürlich, wie bei jeder Drehung an Theilen eines Organismus, die Punkte der wichtigeren Vorderseite es sind, nach deren Auf- oder Abwärtsbewegung die Bezeichnung sich richtet.

Was sich auf die angedeutete Weise durch geübte und streng methodische Beobachtung namentlich an grösseren Fliegern feststellen lässt, darf nicht von vornherein missachtet werden; es soll vielmehr diese Art der Untersuchung allen Naturfreunden, welche viel Gelegenheit zur Beobachtung fliegender Thiere haben, dringend ans Herz gelegt sein. Auch empfiehlt es sich, das Bild des Vogels bei extrem gesenkten, gehobenen, vor- und rückgeführten Flügeln mit einigen Strichen zu skizziren. Daneben ist es von der allergrössten Bedeutung, dass Professor J. E. Marey Mittel und Wege ersonnen hat, um die relativen Bewegungen des Flügels gegenüber dem Rumpfe sich selbst registriren zu lassen. In seinem Buche, La machine animale, Paris 1878, beschreibt er diese Methoden im Zusammenhang. Uns interessirt augenblicklich nur die Art und Weise, nach der Marey die relativen Bewegungen des Flügels zerlegt hat. Es figurirt dabei als eine Componente der Drehbewegung die Rotation um die Längsaxe des Flügels. Es ist von Interesse zu wissen, was bei den Versuchen Marey's dabei thatsächlich gemessen worden ist.

M. befestigte auf die Dorsalseite des Flügels einen dünnen Stab der Länge nach und verband sein inneres Ende durch ein sog. zweiaxiges Gelenk, einen sog. Cardanus, mit einem Widerlager, das am Rumpf des Thieres befestigt war. Das Gelenk war so disponirt, dass es Drehbewegungen erlaubte parallel jeder beliebigen Längsebene durch die *z*-Richtung des Gelenkes und jede Drehung um die *z*-Axe selbst; war der Flügel mit dem Hebelarm starr verbunden, so musste jede Aenderung der Sagittalprofile des Flügels unmöglich gemacht sein. Indem nun aber der Cardanus selbst durch einen Stiel, um eine *qq* Axe drehbar, in das Rumpfwiderlager eingefügt war, vermochte der mit dem Hebel starr vereinigte Flügel ohne erhebliche Behinderung auch Bewegungen auszuführen, bei welchen die Richtung der Sagittalprofile sich änderte. Es lässt sich leicht nachweisen, dass dabei die Drehung

des Stieles des Cardanus genau der Drehung irgend eines Sagittalprofiles des Flügels an einer bestimmten Stelle seiner Längslinie entsprechen musste. Diese Drehung des Stieles des Cardanus, d. h. die Verschiebung eines Fadens, der um den Stiel geschlungen war und sich bei seiner Drehung auf- oder abwickelte, wurde von MAREY direkt registrirt. Was er dabei gemessen hat, ist also nicht die Aenderung der Tangens des Winkels, den die Flügelebene mit der Längslinie des Thieres macht, wie MAREY annimmt, sondern entspricht genau der Aenderung des Winkels, welchen ein Sagittalprofil an einer bestimmten Stelle der Flügellängslinie mit der z-Richtung durch diesen Punkt erfährt. Die Methode von MAREY ist also ganz vorzüglich geeignet, um die Abänderung in der Neigung dieser Sagittalprofile zu registriren.

Die Feststellung der Richtung der Sagittalprofile für jede Phase der relativen Bewegung empfiehlt sich aber nicht bloss deshalb, weil sie mit einiger Sicherheit durch Beobachtung und Versuch gelingt, so dass es möglich wird, die Richtung der Flügelflächen zu beurtheilen; ihre Kenntniss ist auch noch direkt nützlich bei der Bestimmung des Einflusses der Luftwiderstände am Flügel auf die Bewegung des Ganzen.

Der Widerstand der Luft am Flügel wirkt vor allem aus als Druck senkrecht zur Oberfläche, also an irgend einem ebenen Flächenstück in der Richtung seiner Normalen. Letztere aber steht als Perpendikel auf der Flügelebene zu allen Linien der Ebene, welche durch ihren Fusspunkt gehen, senkrecht, also auch zu der sagittalen Profillinie. Errichtet man aber auf demselben Punkt des Sagittalprofils ein zweites Perpendikel zu demselben, welches aber in der Sagittalebene liegt, und legt eine Ebene durch die beiden Perpendikel, so steht diese Ebene senkrecht zu der Profillinie und zur Sagittalebene. In ihr kann man sich die in der Normalen wirkende Kraft zerlegt denken a) in eine sagittale (zv-) Componente, welche also immer noch senkrecht zum Sagittalprofil steht, und b) in eine quere Componente. Die quere Componente des Widerstandes hat keinen locomotorischen Effekt auf das Ganze, die sagittale Componente kommt voll und ganz in Betracht, sei es als nützlicher, sei es als schädlicher locomotorischer Widerstand. Auch wenn wir die absolute Grösse des gesammten senkrecht zu einem Flächenstück wirkenden Widerstandes und der in die zv-Ebene entfallenden Componente nicht kennen, so vermögen wir doch aus der

Neigung des Sagittalprofils einer gegen die Luft bewegten Fläche genau zu bestimmen, wie die z- und v-Componente des Widerstandes sich zu einander verhalten und ob sie positiv oder negativ sind.

Das Verhältniss zwischen den beiden sagittalen Componenten oder ihrer Resultirenden einerseits, der q Componente andererseits ist ebenfalls, wenn auch nicht auf ganz einfache Weise, zu ermitteln, sofern neben der Neigung des Sagittalprofils auch die Stellung der Flügellängslinie (oder der ihr möglichst parallelen Längslinie des Flächenstücks) bekannt ist. Um die absolute Grösse aller Componenten zu berechnen, muss freilich die absolute Grösse des resultirenden Widerstandes gegeben sein, und diese hängt ab von der Geschwindigkeit der Bewegung der Fläche in der Richtung ihrer Normalen. Die resultirende Bewegung des Flächenstückes muss also nach Grösse und Richtung bekannt sein, ebenso wie die Richtung des Flächenstückes selbst.

Man muss sich vor der Annahme hüten, dass die z-, v- und qComponenten der Widerstände berechnet werden können aus den entsprechenden Componenten der Bewegung der Fläche, ihrer Grösse und ihrer Stellung zu den 3 Richtungen.

Die Gesetze des Luftwiderstandes sollen hier nicht weitläufig diskutirt werden, vielmehr muss auf die physikalischen Fachschriften verwiesen werden [1]).

Helmholtz spricht sich dahin aus, dass bei den Verhält-

---

[1]) Mathematische Theorie des Luftwiderstandes: v. Littrow in Gehler's Physikal. Wörterbuch X. Bd. 2 Abth. 1842.

Ueberblick über die Geschichte der Lehre vom Widerstand der Mittel: Munike, Ebenda.

Prechtl, Untersuchungen über den Flug der Vögel. (Wien 1846) pg. 143—155.

Gronau, Die historische Entwickelung der Lehre vom Luftwiderstande. Programm 1865.

Helmholtz, Ueber ein Theorem, geometrisch ähnliche Bewegungen flüssiger Körper betreffend, nebst Anwendung auf das Problem, Luftballons zu lenken. Monatsber. d. Kgl. Pr. Acad. d. W. Berlin 1873, 26. Juni.

G. Wellner, Ueber die Möglichkeit der Luftschiffahrt. Brünn 1880 (pg. 13).

J. Marey, Expériences sur la résistance de l'air pour servir à la physiologie du vol des oiseaux, Physiologie expérimentale (1875 pg. 215).

nissen der Bewegung des Vogels in der Luft der Luftwiderstand proportional v^2 sei:

„In der That macht sich auch bei den meisten praktischen Versuchen in ausgedehnten flüssigen Massen derjenige Widerstand überwiegend geltend, welcher von der Beschleunigung der Flüssigkeit herrührt und namentlich in Folge der Bildung von Trennungsflächen entsteht. Dessen Grösse wächst dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional, während der von der eigentlichen Reibung herrührende Widerstand, der der Geschwindigkeit einfach proportional wachsen sollte, nur bei Versuchen in ganz engen Röhren und Gefässen rein hervortritt."

Nach PRECHTL pg. 145 steht bei kleineren Geschwindigkeiten der Widerstand der Luft im Verhältniss des Quadrates der Geschwindigkeit, bei grösseren Geschwindigkeiten dagegen nimmt er in einem grösseren Verhältniss zu, weil dann auch die Verdichtung der Luft vor der Fläche bedeutend zunimmt. Es wäre demnach für die Verhältnisse des Vogels wohl $W = \zeta F.v^2$, wobei aber ζ einen Faktor darstellt, der bei Geschwindigkeiten, die von 0 an allmählig ansteigen, nicht unerheblich wächst.

Ausserdem ist dieser Faktor nach DUCHEMIN und PRECHTL bei Flächenelementen, die einen Theil einer Fläche ausmachen, welche um eine ihrer Richtungen sich dreht, erheblich grösser als wenn sie mit den benachbarten Stücken derselben Ebene translatorisch bewegt werden. Dies erscheint an und für sich sehr glaubwürdig, wenn man bedenkt, dass bei einer derartigen Bewegung der Fläche mehr neue Luftmassen in Bewegung gesetzt werden müssen, als bei geradliniger translatorischer Verschiebung der Fläche.

MAREY suchte experimentell nachzuweisen, dass bei längere Zeit dauernder Bewegung einer Fläche in annähernd derselben Richtung der Widerstand wieder kleiner wird trotz gleichbleibender Geschwindigkeit, weil mehr und mehr die ganze umgebende Luft in eine strömende Bewegung im Sinne der Bewegung der Fläche versetzt wird. Er glaubt, dass hierauf der Unterschied in der Anstrengung des Flügelschlages beim Beginn des Fluges, bei noch geringer Horizontalgeschwindigkeit einerseits, grösserer Horizontalgeschwindigkeit andererseits beruhe. Im letzteren Fall treffe der niederschlagende Flügel stets neue Luftmassen. Man darf allerdings nicht unberücksichtigt lassen, dass bei fast stationärem Fluge auch der dorsale Widerstand am Flügel erheblich grösser ist. Doch würden MAREY's Versuche mit künstlichen Flügeln beweisen, dass wirklich das von ihm beleuchtete Verhältniss eine

bedeutsame Rolle spielt, vorausgesetzt, dass die Sagittalprofile der Flügel in diesen Versuchen stets genau horizontal orientirt waren.

G. Wellner setzt für atmosphärische Luft den Coefficienten ζ der Formel $W = \zeta F v^2 = 0{,}122$, vorausgesetzt, dass Flügelfläche und Geschwindigkeit in Metermass angegeben ist und W in Kilogramm. Nach der „Hütte" betrage der Coefficient ζ für kleine Flächen 0,114, für grosse 0,184. Nach Prof. Kargl sei $\zeta = 0{,}43$.

Soweit ich diese Verhältnisse beurtheilen kann, scheint es mir demnach erlaubt, die Formel $W = \zeta F v^2$ zu benutzen, aber mit der Reserve, dass ζ nicht unter allen Umständen gleich gross ist, sondern bei sehr kleinen Flächen kleiner, als bei grossen und bei kleinen Geschwindigkeiten erheblich kleiner als bei grossen, vorausgesetzt, dass jene dem Beginn der Bewegung der Fläche gegen die Luft entsprechen.

C. Angaben der Autoren über die Form der Bewegung und die dabei erzeugten Luftwiderstände.

Es handelt sich zunächst nicht um einen historischen Rückblick auf die von verschiedenen Autoren aufgestellten Theorien des Fluges; dazu würde gehören, dass wir auch die über das Verhalten der inneren Kräfte geäusserten Ansichten in Betracht ziehen, was erst mit einigem Nutzen geschehen kann, nachdem die von uns im folgenden vertretene Auffassung die Billigung der Fachmänner erhalten haben wird.

Ich beschränke mich vielmehr zunächst darauf, die wichtigsten Ansichten, welche über die Form der Flugbewegung und die Art, in welcher der Luftwiderstand erzeugt wird, geäussert worden sind, und das, was in den bekanntesten Abhandlungen über den Flug in dieser Hinsicht geltend gemacht wurde, zu besprechen. Auf Vollständigkeit will die folgende Uebersicht nicht Anspruch erheben.

Der erste, welcher die mechanischen Verhältnisse des Fluges eingehender und mit scharfem Geiste erörtert hat, ist Borelli [1]). Nachdem dieser Autor die Struktur der Flügel und ihrer Theile geschildert hat, beschreibt er in der propositio 183 die Be-

[1]) Joh. Alphonsi Borelli, De motu animalium pars prima Lugduni Batavorum 1685. Caput XXII. De volatu.

wegung der Flügel beim Beginn und im Verlauf des Fluges. Die Flügel des Vogels bewegen sich fast senkrecht zum Horizonte (d. h. fast genau in einer Querebene durch die Schultergelenke) auf und ab. Beim Niederschlage gehen sie mit der unteren Breitseite voran, indem der vordere Rand des Flügels, der den harten, gefestigten Theil des Flügels darstellt, durch Muskelkräfte abwärts gezogen wird, entgegen der widerstehenden Luft. Die Anordnung der Flügelknochen und die gute Befestigung der Federn bewirkt, dass die ganze übrige Breite des Flügels dieser Bewegung gut ausgebreitet folgt.

Bei der Hebung aber geht der Flügel nicht mit der Breitseite, sondern mit der vorderen Kante voran, hiebweise durch die Luft. So geschieht die Hebung der Flügel ohne Behinderung durch den Luftwiderstand, ähnlich der Bewegung eines Schwertes. Beim Beginn des folgenden Niederschlages werden die Flügel durch einen queren Zug und durch den Widerstand der Luft ausgebreitet. In Folge des Schlages des Flügels abwärts auf die ähnlich einem festen Körper widerstehende, wenn auch zurückweichende Luft springt die ganze Maschine des Vogels in die Höhe und vollführt gleichsam einen Sprung, so dass der Flug eigentlich nichts Anderes ist, als eine Reihe von Sprüngen durch die Luft. Später, in der prop. 196 erläutert Borelli, wie dabei eine Vorbewegung zu Stande kommen kann. Er giebt eine schematische Zeichnung eines Vogels, der seine Flügel zum Niederschlag gehoben hat [1]). (Tab. XIII Fig. 1). Beim Niederschlage geben die biegsamen Theile des Flügels dem Widerstande der Luft doch in etwas nach, so dass die ganze Breite des Flügels und am meisten der hintere Rand gegenüber dem gefestigten vorderen Rande, an welchem die niederziehenden Muskeln angreifen, zurückbleibt. In Folge davon liegen die hinteren Ränder der gehobenen Flügel über dem Rücken des Thieres einander näher, als die Vorderränder, und es gleichen die Flächen, auf welche der Luftwiderstand wirkt, zusammen denen eines Keiles mit nach hinten gerichteter Schneide. Es muss also der Vogelkörper mit seinen Flügeln vom Widerstande der Luft gleich einem Keile nach vorn hinaus getrieben werden.

Auf diese Weise bewirkt der Flügelschlag gleichzeitig, dass

---

[1]) Diese Figur ist von Pettigrew (Die Ortsbewegung der Thiere etc. Deutsche Uebersetzung, Leipzig 1875 pg. 190) reproducirt; es handelt sich aber nicht, wie P. angiebt, um einen „künstlichen Vogel."

der Vogelkörper emporgetrieben wird, resp. entgegen der Schwere sprungweise schwebend sich hält, und dass er zugleich horizontal vorwärts bewegt wird. Die Annahme früherer Autoren, dass die Flügel nach hinten gegen den Schwanz schlagen, wie die Ruder eines Bootes, sei vollständig irrig. BORELLI's Vergleich ist, wie leicht einzusehen, nicht ganz geschickt, insofern er nur für so lange einigermassen verständlich ist, als die Flügel über die Horizontalstellung gehoben sind. Doch hat man mit Recht an seine Beweisführung keinen zu strengen Massstab angelegt und ihn als den Begründer der Ansicht gelten lassen, dass der Flügel in pronirter Stellung niederschlage und dass der dabei entwickelte Luftwiderstand eine nach vorn wirkende Componente neben einer vertical aufwärts gerichteten habe [1]).

BARTHEZ [2]) ist der Meinung, dass der Flügel beim Niederschlage schräg abwärts und rückwärts geführt wird, und belehrt uns darüber, dass dies bereits von GREW richtig beobachtet und von DESLANDES und Anderen angenommen worden sei.

BARTHEZ kennt nicht den Satz, dass der resultirende locomotorische Impuls der Resultante des Luftwiderstandes entspricht, und legt daher auf die Stellung der Flügelfläche beim Niederschlag kein Gewicht. Doch vergleicht er die Flügelbewegungen den Bewegungen, welche der Mensch beim Schwimmen mit seinen Armen macht. Er stimmt der von SILBERSCHLAG (1774) aufgestellten

---

[1]) Die weitläufige Darstellung der Ansichten von BORELLI, welche wir bei PETTIGREW finden, ist im Ganzen, abgesehen von dem oben besprochenen Punkte, correkt. Die Kritik aber, welche P. diesen Ansichten angedeihen lässt, ist nicht zutreffend. P. behauptet, BORELLI's Ansicht, dass der Vogel beim Fliegen sich verhalte wie ein Keil, sei unrichtig. Keilwirkung bestehe allerdings, jeder Flügel bilde aber beim Fluge 2 Keile oder Kegel. Damit meint P. die Räume, welche durch die Hin- und Herbewegung des Flügels, der Spitze gegenüber der mehr in Ruhe bleibenden Basis, des Hinterrandes gegenüber dem weniger bewegten Vorderrande, beschrieben werden. Zugegeben, dass der Flügel wirklich diese (S. 197 von P. beschriebenen) Kegel oder Keile bildet, so ist doch offenbar hier das tertium comparationis mit einer Keilwirkung ein ganz anderes. Bei P.'s Kegeln besteht die Aehnlichkeit bloss in der äussern Gestalt der Räume, innerhalb welcher die Oscillation erfolgt. BORELLI aber vergleicht die Wirkungsweise der Kräfte des Luftwiderstandes auf die wie beim Keil gestellten Flügelflächen mit den Kräften, welche das Austreiben eines Keiles bewirken.

[2]) BARTHEZ, Nouvelle Méchanique de l'Homme et des Animaux Carcassonne 1798. 6. Section. Du vol des oiseaux.

Meinung bei, dass der Lenkfittich ein wesentliches Hülfsorgan zur Ausführung von Wendungen nach der Seite sei.

Mit dem Niederschlage des Flügels verbindet sich nach BARTHEZ eine Streckung des Ellbogen- und Handgelenkes. Die Federn dienen in ihrer Ausbreitung zur Vergrösserung des Widerstandes. Ausserdem aber sind sie vermöge ihrer Elasticität von einiger Bedeutung für die Prolongation der Einwirkung des Widerstandes, indem sie beim Niederschlage etwas abgebogen werden und nach Vollendung desselben erst in ihre Gleichgewichtslage zurückkehren. Bei der Hebung wird der Flügel, wenn die Flügelschläge nicht zu rasch folgen, eingezogen, so dass die Federn mit möglichst wenig schädlichem Luftwiderstand bewegt werden. Auch an und für sich erleichert die grössere Kürze des Hebelarms die Hebung.

Reich an zutreffenden Beobachtungen über die Flugbewegungen ist das wenig bekannte Werk von ZACHARIAE [1]).

Ueber den uns interessirenden Punkt äussert er Folgendes: In Folge des perpendiculären Niederschlages des Flügels erhält der Rumpf einen Impuls nach oben. Sein schräg nach vorn aufsteigender Rücken wirkt aber als Drachenfläche und es „schiesst der Rumpf in einer gegen den Horizont geneigten Richtung nach vorn hin aufwärts, gleichsam unter einer über ihm liegenden und ihm das senkrechte Steigen verwehrenden schiefen Fläche."

Dazu aber, dass der Vogel nicht aufsteige, sondern horizontal vorwärts gehe, muss die Hebung der Flügel dienen, bei welcher an der oberen Seite des Flügels ein nach unten gerichteter Widerstand erzeugt wird. Das Emporsteigen des Vogels wird dadurch gehemmt. Doch ist die Wirkung des Niederschlages grösser als diejenige der Flügelhebung, weil der Flügel bei der ersteren Bewegung aus der natürlichen concaven Gestalt möglichst in die ausgebreitete übergeht, bei der Hebung aber sich stärker wölbt, also verkleinert und mit der Wölbung voran gegen die Luft geht, ausserdem durch den Widerstand der Luft namentlich hinten stärker zurückgehalten wird. Möglicherweise kommt unter Umständen eine aktive supinatorische Umstellung des Flügelgerüstes hinzu. Jedenfalls ist der Neigungswinkel (der Sagittalprofile) gegenüber dem Horizont kleiner beim Niederschlage, als beim Aufschlage. ZACHARIAE ist also unzweifel-

---

[1]) AUG. WILH. ZACHARIAE: Die Elemente der Luftschwimmkunst. Wittenberg 1807.

haft der Meinung, dass der Flügel in supinirter Stellung nach oben geht und dabei an seiner oberen Seite einen Luftwiderstand erzeugt, hat aber nicht berücksichtigt, dass ein solcher Widerstand den Vogel nothwendig vorwärts treiben müsste, lässt jenen vielmehr rückwärts abwärts wirken. (S. Fig. 9). Ueber die Richtung der Schlagebene zum Körper des Thieres äussert sich ZACHARIAE nicht ausdrücklich, er scheint aber der Meinung zu sein, dass sie wesentlich vertical und quer steht (perpendiculär).

STRAUS-DÜRCKHEIM in seiner mit staunenswerthem Fleisse ausgearbeiteten Anatomie des Maikäfers [1]) spricht die Ansicht aus, dass bei den Insecten sowohl wie bei den meisten Vögeln der Flügel als Ganzes, ohne sich abwechselnd zu beugen und zu strecken, hin und her schlage. Die Ebene, in welcher diese Bewegung geschieht und welche wir kurz als „Schlagebene" bezeichnen wollen, ist aber nach ihm nicht nothwendig eine verticale Querebene durch die Einlenkungsstellen der Flügel am Rumpf. Fliegt das Thier schräg vorwärts aufwärts, so schlagen die Flügel von hinten oben nach vorn unten, desgleichen in manchen Fällen, wenn sich das Thier (Insect) in stationärem Fluge an derselben Stelle hält. Beim Fluge nach vorn und unten dagegen gehen die Flügel von vorn oben nach hinten unten und umgekehrt. Der Niederschlag geschieht in pronirter Stellung des Flügels, indem die biegsamen hinteren Theile des Flügels durch den Widerstand der Luft abgebogen und zurückgehalten werden. Die resultirende Einwirkung des Widerstandes für den ganzen Niederschlag entspricht ungefähr in ihrer Richtung nach vorn oben der Richtung des Widerstandes, welche der Flügel beim Passiren der Mittellage erzeugt. Bei der Hebung des Flügels bleibt umgekehrt der Flügel, der schon in der Gleichgewichtslage supinirt sein kann (Coleopteren), mit seinem hinteren Theil zurück, geht also in supinirter Stellung mit der oberen Breitseite voran gegen die Luft und erzeugt einen nach unten vorn gerichteten Widerstand.

Es giebt nach STR.-D. noch eine zweite Art des stationären Fluges, dadurch charakterisirt, dass der Rumpf fast gar nicht aufgerichtet ist und dass der Flügel sich annähernd in einer Verticalebene hin und her bewegt; dabei wird er beim Niederschlag

---

[1]) HERC. STRAUS-DÜRCKHEIM. Considérations générales sur l'anatomie comparée des animaux articulés. Textband und Atlas 4°. Paris, Strassbourg, Bruxelles 1828.

in supinirter Stellung gehalten, bei der Hebung aber geht er auch hier, entgegen einem auf seine obere Fläche wirkenden Widerstand, stärker supinirt nach oben.

Nicht alle Vögel fliegen übrigens auf die zuvor angebene Weise mit ausgestreckten Fügeln. Die Spechte z. B. geben sich durch 3—4 schnelle Flügelschläge den nöthigen Impuls, um mit an den Leib angeschlossenen Flügeln in einer flachen aufwärts convexen Curve auf und ab zu steigen, worauf dann eine neue Aktion erfolgt.

Joh. Müller [1]) scheint der Meinung zu sein, dass der Flügel direkt nach unten schlage und dabei die Unterfläche etwas nach hinten wende, er fügt aber hinzu, dass die Neigung der Flügel zur Unterhaltung der horizontalen Bewegung nicht stark zu sein brauche, denn selbst bei einem „wagrechten Schlag" des Flügels müssen die biegsamen Schwungfedern durch den Widerstand der Luft sogleich eine schiefe Ebene gegen den vorderen nicht bebeweglichen Rand des Flügels bilden.

Die Hebung geschieht mit eingezogenem Flügel.

Prechtl [2]) erörtert, nachdem er die inneren und äusseren Verhältnisse des Vogelkörpers und seiner Flugwerkzeuge beschrieben, im 3. Kapitel (pg. 115 u. ff.) die Flugbewegungen folgendermassen:

Der Rumpf liegt seinen Beobachtungen zu Folge beim gewöhnlichen Fluge annähernd horizontal; der Niederschlag des Flügels erfolgt senkrecht (in einer verticalen Querebene durch die Schultergelenke), allenfalls auch in einer Richtung, welche nach vorn oder hinten mit der senkrechten einen kleinen Winkel macht (§ 128, 181).

Am Ende des Niederschlages wird der Flügel zusammengezogen und unmittelbar darauf der bereits vollständig zusammengezogene Flügel, (dessen Schwinge dem Vorderarm, dessen Vorderarm dem Oberarm und dessen Oberarm dem Leib angelegt ist), gehoben; in der höchsten Lage wird er durch Muskelkraft fast augenblicklich, bis zu den äussersten Schwingen hinaus ausgestreckt, und der Lenkfittich wird vorgelegt, wobei die sich entfaltenden Schwungfedern mit den scharfen Rändern voran durch die Luft gehen. Die Hebung geschieht also am vollständig eingezogenen Flügel, der ausserdem noch mit einer stark gewölbten oberen

---

[1]) Joh. Müller, Handbuch der Physiologie des Menschen. II. 1. Coblenz 1837, pg. 120.

[2]) J. Prechtl, Untersuchungen über den Flug der Vögel. Wien 1846.

Fläche gegen die Luft geht, also möglichst wenig Luftwiderstand erzeugt. Der Niederschlag erfolgt meist bei vollständig gestrecktem Flügel, in gewissen Fällen aber bei unvollkommener Streckung, indem namentlich Vorderarm und Oberarm noch näher am Leib und im Ellbogen stärker gegeneinander geknickt bleiben, die Schwinge aber wie gewöhnlich ausgebreitet ist, so namentlich, wenn es gilt, die Vorbewegung zu mässigen. (Der Falke beim Rütteln).

Die Ebene des ausgestreckten Flügels läuft im Ganzen parallel der Längsaxe des Rumpfes bei jeder Stellung; einzelne Theile der Flügelfläche sind aber dabei stets nach vorn und unten gegen den Horizont geneigt (pronirt), nämlich:

1) Das Dreieck der zwischen Oberarm und Vorderarm vorn ausgespannten vorderen Flughaut, welches von PRECHTL als Windfang bezeichnet wird.
2) Der Lenkfittich, welcher sich über die Mittelhand und das erste Glied des grossen Fingers vorwärts hinausschiebt.
3) Die erste Schwungfeder oder die Lenkfeder, welche gewöhnlich kürzer als die folgenden ist.
4) Die in Folge der Wirkung des Streckers und Vorwärtswenders des grossen Fingers gleich dem vorderen Rande eines Gewölbes abwärts vorragenden zwei ersten Schwungfedern, die auf die Lenkfeder nach hinten folgen.

Alle diese Theile zusammen werden als Schranke bezeichnet. Diese ist sowohl bei den Schnellflügeln oder Stossflügeln (deren Schwungfedern steifer, schiefer und fester dem Knochen aufgesetzt und auch bei stärkster Ausbreitung kaum auseinander gespreizt sind) als bei den Ruderflügeln vorhanden.

Bei den Ruderflügeln kommen dann aber noch hauptsächlich die ausgeschnittenen, mit den freien Enden weit auseinandergespreizten „Ruderfedern", welche durch den Luftwiderstand selbst und unter Mitwirkung von denselben Muskeln des grossen Fingers schräg (in Pronation) gestellt sind, in Betracht. Die Krähe, der Weih, die Bussarde und gewisse andere Falken haben 5 solcher Federn, Adler und Seeadler 6, der graue und weissköpfige Geier 7, der Condor 8.

Dieses ganze System schräger Flächen dient der Vorwärtsbewegung, indem der an der Unterseite beim Niederschlag erzeugte Widerstand eine vorwärtstreibende Componente hat. Die Grösse dieses Einflusses ist regulirbar; durch Zunahme der Beugung im Ellbogen z. B. wird der Windfang verkleinert und der vorwärtstreibende Einfluss vermindert. (Genaueres s. § 133, 182 u. a. a. O.)

Prechtl ist durch seine mathematische Behandlung der Elemente des Fluges und durch die Beobachtung zu der Annahme gelangt, dass „beim Fluge des Vogels der Niederschlag senkrecht geschehe, folglich die Vorwärtsbewegung nur durch die Wirkung der Schranke und der Ruderfedern bewirkt werde. — Man bemerke auch in dieser That, wenn man den Flügelschlag grösserer Vögel genau betrachte, dass dieser Niederschlag senkrecht sei. Das scheinbare Zurückschlagen des Flügels, das man von einem gewissen Standpunkte aus bemerkt, ist nach P. eine optische Täuschung, weil am Ende des Niederschlages die Schwinge eingezogen, folglich nach rückwärts bewegt wird, welche Bewegung noch dem Niederschlage zuzugehören scheint".

Die Flügelfläche bewegt sich nach Giraud-Teulon [1]) in ausgespanntem Zustande von oben nach unten und zugleich von vorn nach hinten. Bei der Hebung faltet sich der Flügel zusammen und durchschneidet die Luft so, dass dabei der vorstehende Winkel des Radiocarpalgelenkes und der obere scharfe Rand des Flügels selbst, dem dann die scharfen Federränder folgen, vorangehen. Auf diese Weise wird bewirkt, dass der Luftwiderstand möglichst gering ist.

Nach d'Esterno [2]) bewegt sich die Flügelspitze in einer schmalen Ellipse, deren Längsdurchmesser von oben vorn nach unten hinten gerichtet ist, und zwar beschreibt sie beim Niederschlag die vordere Peripherie der Ellipse in rückwärts abwärts gerichteter Bewegung und steigt bei der Hebung in der hinteren Längsseite der Ellipse vorwärts aufwärts empor. Esterno giebt zu, dass mitunter, bei besonders rascher Vorbewegung, der Flügel beim Niederschlag seine Unterfläche rückwärts wendet (also pronirt ist). Für gewöhnlich aber sei die Unterseite beim Niederschlage weder vorwärts noch rückwärts gewendet (die Sagittalprofile bleiben horizontal).

Bei der Hebung findet eine supinatorische Drehung des Flügels statt (Drachenwirkung).

Krarup-Hansen [3]) hat eine kleine Schrift über den Flug

---

[1]) Fel. Giraud-Teulon, Principes de Mécanique animale ou étude de la locomotion chez l'Homme et les animaux vertébrés. Paris 1858.

[2]) d'Esterno. Du vol des Oiseaux. Indication des 7 Lois du Vol ramé et des 8 lois du Vol à Voile. Paris 1864.

[3]) C. J. L. Krarup-Hansen, Beiträge zu einer Theorie des Fluges der Vögel, der Insecten und Fledermäuse. Copenhagen 1869.

veröffentlicht, welche manche gute Bemerkung, doch auch sehr vieles Incorrecte enthält. Es ist ungemein schwierig, derartigen nur halb wissenschaftlich, aber ganz gemeinfasslich sein wollenden Abhandlungen eine gerechte Kritik angedeihen zu lassen. Ich beschränke mich für den Augenblick nur darauf, die Ansicht des Autors bezüglich der Form der Bewegung zu reproduciren.

Die Flügelspitzen der fliegenden Thiere beschreiben nach Kr.-H. sehr grosse Bogen in einer zur Längsrichtung des Thieres senkrecht stehenden Ebene. Der Vorderarm ist regelmässig stärker und steifer; der biegsame Hinterrand der Flügel bleibt sowohl beim Niederschlag als bei der Hebung gegenüber dem vorderen zurück. So wird ein schräg vorwärts aufwärts oder schräg vorwärts abwärts gerichteter Widerstand erzeugt. Der Umstand, dass die Luft am Flügel in Bewegung gesetzt wird, verdoppelt den Stoss des Luftwiderstandes bei der darauf folgenden Gegenbewegung; dadurch und durch eine nur unklar dargestellte Wirkung der Elasticität der Flügelflächen sollen die letzteren in eine Art von Schwingung um die Vorderränder gelangen, wobei aber doch die Hinterränder im Ganzen kleinere Bewegungen machen, als die Vorderränder! Die resultirende treibende Kraft wirkt in der Richtung der Flügelflächen, sodass z. B. Sperlinge zum Aufsteigen sich aufrichten. Der Flug wird also ebensowohl durch den Aufwärtsschlag als durch den Abwärtsschlag des Flügels gefördert. Auf die Unterscheidung verschiedener Typen des Fluges und ihre Benennung durch Kr.-H. will ich nicht näher eingehen.

Die Darstellung von Pettigrew [1]) gleicht einem verwickelten Knäuel. Der Faden der Darstellung ist auf das Unverantwortlichste verschlungen und verknotet, öfters gänzlich zerrissen und falsch wieder aufgenommen. Die einzelnen isolirbaren Gedanken erweisen sich meist als unbrauchbares Material, sobald mechanische Fragen in Betracht kommen, indem hier dem Autor eine gute Grundlage fehlt; schätzenswerth sind manche Beobachtungen. Es ist zu bedauern, dass dieses Werk in die internationale Bibliothek aufgenommen worden ist und soviel Verbreitung gefunden hat. Auch nur in Folge dieses Umstandes sehe ich mich zu einer ernsten Kritik genöthigt, welche ich sonst gern unterlassen würde. Ich will versuchen, die wesentlichen Züge der Pettigrew'schen Lehre

[1]) J. Bell Pettigrew. Die Ortsbewegung der Thiere nebst Bemerkungen über die Luftschifffahrt. Deutsche Ausgabe. Internat. wiss. Bibliothek X. Bd. Leipzig 1875.

herauszupräpariren und dem Leser in übersichtlicherem Zusammenhang vorzuführen.

Bei den Vögeln und Fledermäusen geschieht nach PETTIGREW der Niederschlag des Flügels nicht direkt nach unten, wie BORELLI, der HERZOG VON ARGYLL u. A. annehmen, und auch nicht, wie OWEN, MACGILLIVRAY, BISHOP und LIAIS glauben, nach unten und hinten, sondern relativ zum Körper nach unten und vorn (pg. 195, 169).

Die Rückführung geschieht in umgekehrter Richtung, nach oben und hinten. Bei den Insecten geht die Schlagebene noch mehr horizontal von oben und hinten nach unten und vorn.

Es stehe fest, sagt P. auf Seite 195, dass der Flügel bei dem Abwärtsschlagen nur ganz wenig gegen den Horizont geneigt sei.

An verschiedenen anderen Stellen aber vertritt P. ausdrücklich die Meinung, dass beim Beginne des Niederschlages die sagittalen Profile des Flügels annähernd horizontal stehen und dass nun im Verlaufe des Niederschlages eine starke Supination des Flügels erfolgt, welche am Ende des Niederschlages ihr Maximum erreicht (S. 84 u. a. a. O.). Es steht dann der Flügel beim Vogel zuletzt rechtwinklig zum Horizont (S. 138, Fig. 83), bei den Insecten erreicht die Supination keinen so hohen Grad. Während der Hebung dreht sich der Flügel in umgekehrter Richtung wieder zurück, bei Insecten ebensowohl wie bei den Vögeln (Fig. 83 und 84). Die Flügelfläche ist beim Niederschlage derart schraubenförmig gewunden, dass sie sich bei dieser supinatorischen Drehung während der Streckung (Niederschlag) in und auf die Luft schraubt, während sie bei der Beugung (oder der Hebung), wo sie im entgegengesetzten Sinne gewunden ist (s. u.), sich aus der Luft wieder herausschraubt.

„Der Flügel der Fledermäuse und Vögel lässt sich mithin mit einem ungeheuren Bohrer vergleichen, dessen Achse die Knochen des Flügels, dessen Gewinde die Flughaut darstellt". (S. 152, 153).

Ein treffendes Urtheil über diese letzten Anschauungen hat schon MAREY abgegeben. (La machine animale pag. 219, 220).

Es ist schwer zu begreifen, wie P. dazu gekommen ist, die oben angeführte Meinung, dass der Flügel beim Niederschlage so stark supinirt werde, für Vögel und Insekten zu vertreten, während er doch (S. 87 u. ff. S. 120 u. ff. Fig. 53, Fig. 66—69) zuerst die

Flügelstellungen bei den Insekten in ganz anderer Weise beschrieben hat. Die schematischen Figuren 68 und 69 z. B. zeigen deutlich, dass der Insektenflügel stets mit seinem steiferen Vorderrande, ausserdem beim Nieder- oder Vorschlage mit der ventralen, bei dem Rückschlage mit der dorsalen Breitseite voran gegen die Luft geht, der biegsame Hinterrand des Flügels also immer etwas zurückbleibt. Bei solcher Flügelstellung kann sich wirklich eine resultirende, wesentlich hebende Wirkung ergeben. Auch hat P. diese Verhältnisse nicht unrichtig durch die Bewegung eines künstlichen, in einem Kugelgelenke befestigten Flügels nachgeahmt und gefunden, dass der Flügel nach der Seite des gefestigten Flügelrandes auszuweichen sucht, und sich, wenn man dies durch gleichmässigen Gegendruck an der Flügelwurzel verhindert und seine Wurzel einfach und geradlinig hin und her treibt, vermöge der wechselnden Aufbiegung des Hinterrandes in einer Achtertour bewegt.

Ähnliche Versuche mit einem in der Mittelstellung horizontal ausgebreiteten, in verticaler Schlagebene bewegten Flügel (Fig. 52 pag. 88, Fig. 53) ergaben dieselbe Tendenz des Flügels, nach der Seite des starren Randes, hier also horizontal nach vorn auszuweichen. Der Flügel beschrieb eine ganz ähnliche, aber vertical gestellte Achtertour; auch hier wieder musste natürlich abwechselnd die untere Breitseite mit der vorderen Kante voran (abwärts), dann die obere Breitseite mit der vorderen Kante voran (aufwärts) gegen die Luft vorgegangen sein. Bei diesem Modell des Vogelflügels erfolgte also der Niederschlag in pronirter, die Hebung in supinirter Stellung und es lässt sich gegen diese Versuche von P. wirklich nichts einwenden. Combiniren sich nun aber die relativen Bewegungen des Insekten- oder Vogelflügels in ihren Achtertouren mit den horizontalen Verschiebungen des ganzen Körpers, so lösen sich allerdings die Achtertouren zu Schleifen-, dann zu Zickzack- und Wellenlinien auf, wie P. dies auf S. 129 darstellt; aber man versteht nicht, warum sich nun die Stellungsänderung der Sagittalprofile des Flügels plötzlich anders, nämlich so wie sie in Fig. 83, 84, 86, 87 dargestellt ist, verhalten soll.

Vielleicht ist P. auf folgende Weise irregeführt worden (die Einsicht in die Gründe seines Irrthums erlaubt vielleicht eine mildere, jedenfalls aber eine gerechtere Beurtheilung).

Am Ende des Niederschlages findet bei dem künstlichen Flügel, der eine vorwärts- oder aufwärtstreibende Wirkung hat, eine Umstellung der Fläche in supinatorischem Sinne statt. Pettigrew,

der sicher den Satz nicht gekannt oder im Gedächtniss behalten hat, dass der locomotorische Impuls beim Flügelschlage wesentlich nach Grösse und Richtung mit dem senkrecht zur Flügelfläche gerichteten Luftwiderstande übereinstimmt, hat die Umstellung der Fläche am Ende des Niederschlages als das Wesentliche, Treibende aufgefasst; der Schluss lag dann für ihn nahe, dass sie ebensogut während des ganzen Niederschlages vor sich gehen könne. Dass aber bei der Hebung die Supination des Flügels sich mehr und mehr vermindere, ist sicher das Ergebniss des im folgenden dargelegten Gedankenganges unseres Autors: Während der Rückführung oder Hebung des Flügels geht dieser bei fehlender Vorbewegung des Ganzen mit der Dorsalseite und mit dem dickeren Rande voran in starker Supination, ja beim Insect in Hypersupination gegen die Luft (Fig. 68 u. 69). Kommt aber genügend grosse Vorbewegung des Ganzen hinzu, so wird nun doch die bei der relativen Rückbewegung nachfolgende Breitseite des Flügels absolut gegen die Luft bewegt; der biegsame Hinterrand des Flügels wird dadurch stärker zurückgehalten, Es wird während der ganzen Hebung des Flügels die Supination vermindert (Rückkehr aus der Supinationsstellung zur Mittelstellung). Vgl. pg. 138.

Dass Pettigrew auf S. 85 die Ansicht vertritt, es dränge bei der Hebung des Flügels gleichzeitig „die obere Fläche „desselben gegen die Luft, gleichzeitig aber auch die untere Fläche „durch den in Bewegung befindlichen Körper, indem sie wie ein „Drache schräg nach oben bewegt wird", darüber dürfen wir uns bei allem Uebrigen nicht allzusehr wundern.

Auf Seite 196 (Fig. 113 u. 114) sucht schliesslich P. noch direkt zu beweisen, dass ein horizontaler Flug nicht möglich sei, wenn der Flügel beim Niederschlage pronirt, bei der Hebung supinirt gehalten werde, dass dagegen durch den Niederschlag eines supinirten und supinatorisch gegen die Luft gedrehten Flügels der Körper nach vorn und oben gehoben, durch Hebung des supinirten Flügels aber, bei fortgesetzter Abnahme der Supination, direkt nach vorn, im ganzen also nach vorn oben getrieben und bei gleichzeitiger Mitwirkung der Schwerkraft horizontal vorwärts bewegt werde (S. 197). Wir brauchen über die Beweiskraft dieser Deduction kein Wort zu verlieren.

Der Flügel dreht sich also nach Pettigrew

1) um die Schulter als Mittelpunkt auf und ab und beschreibt einen Kegel; und zwar umschreibt die Spitze, wenn man von

der Vorbewegung des Ganzen absieht, in einer Achtertour die nach aussen und etwas nach unten gewendete (pg. 130) Basis des Kegels. Der Flügel dreht sich ferner

2) um den Vorderrand als Axe und beschreibt so, wenn man von der übrigen Bewegung absieht, wieder einen Kegel (sollte heissen einen Keil), dessen Basis durch den hinteren Flügelrand beschrieben und ebenfalls von einer Achtertour umgrenzt wird und nach hinten und etwas nach unten sieht (130).

Beide Bewegungen können mit den Bewegungen eines Wrickruders verglichen werden, die erste treibe den Körper nach oben, die zweite nach vorn. (Vergl. mit Bezug hierauf diese Abh. S. 47).

Ein solcher Vergleich ist aber durchaus unstatthaft. Die von P. angenommenen Wirkungen könnten nur dann stattfinden, wenn bloss die Rückbewegung der Flächen von den Extremstellungen zu den mittleren Excursionslagen mit grosser Kraft und mit Erzeugung grosser Widerstände geschehen würden, die Bewegungen aber aus den Mittellagen in die Extremstellungen mit viel geringerem Widerstande vor sich gehen könnten [1]), während nach PETTIGREW etwas derartiges in Wirklichkeit nicht vorkommt (S. 130).

Beim Niederschlag ist nach P. der Flügel ausgestreckt; und es schlagen die Flügel weiter unter die Horizontalebene des Schultergelenkes hinab, als sie sich bei der Hebung über dieselbe erheben (S. 131). Bei der Hebung wird der Flügel eingezogen; die Unterfläche drückt als Drachenfläche gegen die Luft; weil aber unser Autor annimmt, dass zugleich auch an der Oberseite ein Widerstand erzeugt wird (S. 85), so lässt er die Luft von oben nach unten zwischen den bei der Hebung ventilartig sich von einander entfernenden grossen Federn durchströmen (pg. 129).

Die Flügelflächen sind ganz allgemein schraubenförmig gewunden, und P. schreibt diesem Umstande fast wunderbar erscheinende Effekte zu. Die Schraubenflächen ändern vielfach ihre Gestalt (pg. 126 u. ff.). Die Ränder der Flügel sind bei Insekten und Vögeln während der Streckung (Niederschlag) und Beugung (Hebung) in entgegengesetzten Curven gekrümmt.

Ich gebe hier zwei Abbildungen (Fig. 8 und 9), welche, wie ich glaube, die wirkliche Meinung von P. für den Vogelflügel (pg. 126 u. ff.) gut illustriren. Diese geht, wie mir scheint, da-

---

[1]) Vgl. die Erörterungen über die Bewegungen des Schwimmschwanzes der Fische in meiner Schrift: Zur Lehre von der Ortsbewegung der Fische. Stuttgart 1882.

hin, dass bei der Streckung (im Niederschlag) der basale Theil des Flügels stärker supinirt ist, als der distale (unsere Fig. 8). Bei der Beugung (Hebung) dagegen verhalte sich die Sache umgekehrt (unsere Fig. 9); *a b c* bedeutet in beiden Figuren den

Fig. 8.

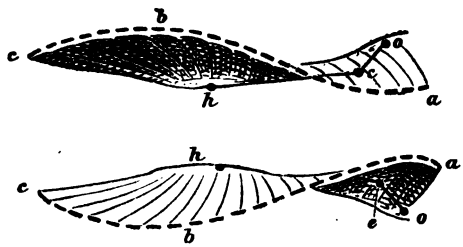


Fig. 9.

Hinterrand, *o h c* den Vorderrand des Flügels; *e* ist das Ellbogen-, *h* das Handgelenk. Die Umstellung erfolgt bei den Vögeln und Fledermäusen durch die Knochen des Flügels, bei den Insekten durch die Rippen.

In Folge dieser verschiedenen Neigung der verschiedenen Sagittalprofile des Flügels und der gegenseitigen Umstellbarkeit vermögen sich die Flügeltheile überall ihren Trajectorien bis zu einem gewissen Grade anzuschmiegen, so dass z. B. die geringe Supination der Flügelspitze beim Niederschlage der grösseren Abwärtsgeschwindigkeit entspricht (S. 138, 143).

Diesen letzten Aufstellungen des Autors über die Schraubenform des Flügels und ihre Bedeutung enthalten viel Richtiges; doch ist das Wesen der Sache nur angedeutet, nicht klar explicirt. Ausserdem verdienen noch zwei andre Punkte seiner Darstellung Beachtung und Lob:

P. macht darauf aufmerksam, dass der Rumpf sinken muss und, wie die Beobachtung namentlich an Möven lehre, wirklich sinkt, während der Flügel in die Höhe geht, und umgekehrt (Fig. 83, 86, 87, dann namentl. S. 134).

Besonders bemerkenswerth aber ist, dass P. nicht bloss die relative Bewegung der Theile, sondern die absolute, die Trajektorien der Flügeltheile und des Rumpfes und die Stellung der Oberflächen bei dieser Bewegung ins Auge fasst. Man wird bedauern, dass er trotzdem nicht dazu gekommen ist, die beim Fluge erzeugten Widerstände nach dem Ort und der Richtung ihrer Einwirkung gehörig zu würdigen.

Legen wir das Buch von PETTIGREW im Ganzen unbefriedigt bei Seite, so folgen wir mit um so grösserem Interesse und mit um so rückhaltloserer Anerkennung den Auseinandersetzungen von J. E. MAREY, der sich durch eine Reihe wichtiger Untersuchungen für die Lehre von der Ortsbewegung der Thiere und des Menschen die grössten Verdienste erworben hat. Wie in andern Gebieten, so kann auch hier ein wirklicher Fortschritt in der Methodik der Untersuchung nicht genug gewürdigt werden, und einen solchen Fortschritt repräsentirt die Verwendung der verschiedensten Registrirapparate zur Aufzeichnung der bei der Locomotion sich abspielenden Bewegungen und Krafteinwirkungen.

Es ist hier am Platze, die Hauptergebnisse von MAREY's langjährigen Studien über die Ortsbewegung in der Luft, wie er uns dieselben im 3. Buche von La machine animale (Paris 1878) vor Augen führt, zu durchmustern.

Zunächst lässt M. die Flügel von Insecten entlang einem rotirenden, berussten Cylinder auf- und abschlagen und gewinnt so werthvolle Kenntnisse über die Flügelbewegung von Insecten, die vom Untersucher festgehalten werden, oder sich etwa „schwebend", wie M. sich ausdrückt (in stationärem Fluge nach STRAUS-DÜRCKHEIM), frei an derselben Stelle der Luft halten.

Die Zahl der Flügelschläge wird bestimmt, die grosse Regelmässigkeit der Aktion und der Synchronismus in der Thätigkeit beider Flügel constatirt. Durch Beobachtung von Insecten, denen eine Breitseite des Flügels vergoldet war, und durch die von den Flügeln am berussten Cylinder aufgezeichneten Curven ermittelte MAREY, dass die Flügelspitze (beim stationären Fluge) eine geschlossene Achtertour beschreibt. Es bewegt sich dann naturgemäss die Flügelspitze, wenn sie die beiden Schmalseiten der 8 durchläuft, von derselben einen Breitseite *a* der Achterfigur nach der zweiten Breitseite *b* hin. Es wurde experimentell von M. festgestellt, dass die Breitseite *a* bei natürlicher Flugstellung des Rumpfes nach vorn oder oben gewendet ist, d. h. nach derjenigen Seite hin, nach welcher der Flügelschlag den Körper des Thieres zu treiben strebt. Der eine Schlag kann immer als Niederschlag, der andere als Aufschlag bezeichnet werden. Der Flügel geht bei seiner Bewegung mit den Breitseiten, beim Niederschlag mit der ventralen, bei der Hebung mit der dorsalen voran gegen die Luft. Und zwar ist der vordere, der vorderen Breitseite der 8 zugewendete, gesteifte oder verdickte Rand des Flügels in der Bewegung stets etwas voraus. In Folge dieses Umstandes hat der Luftwiderstand sowohl beim

Niederschlag als bei der Hebung eine gegen die vordere Breitseite der 8 gerichtete Componente.

MAREY ist der Meinung, dass dem Flügel durch die Muskelthätigkeit bloss eine Hin- und Herbewegung ertheilt werde, und dass das Vorwärts- und Rückwärtsausweichen aus der Ebene des Impulses zur Bildung der Achtertour durch das Zu- und Abnehmen jener Componente des Widerstandes und die Biegsamkeit des Flügels resp. seiner Befestigung erklärt werde. Ein künstliches Modell, welches nach diesem Principe getrieben wird, zeigt alle Erscheinungen der Bewegung des Insectenflügels (Synthese der Flugbewegung). Im Ganzen werden durch diese Untersuchungen und Erwägungen die Ansichten von STRAUS-DÜRCKHEIM über den Flug der Insecten bestätigt.

Die Verhältnisse beim Flug der Vögel sind aber nach M. wesentlich verschieden von denen bei den Insecten. Wie PRECHTL besonders genau dargethan habe, sei hier der Flügel nur geeignet, beim Schlag mit der Ventralseite voran einen Luftwiderstand zu erzeugen, während bei dem Rückschlag die Luft leicht von der Dorsalseite zur Ventralseite des Flügels hindurchdringen könne.

Ueber die sinnreichen Apparate nun, welche MAREY construirt hat, um die Flugbewegungen verschiedener Vögel zu registriren, möge man das Original des Genaueren nachlesen. Es wurde zunächst die Zahl der Flügelschläge pro Secunde oder die Dauer eines Flügelschlages, ferner das zeitliche Verhältniss des Niederschlages und der Hebung ermittelt, und zwar war es das eine Mal die relative Bewegung des Flügels selbst gegenüber dem Rumpfe, welche den Schreibhebel des Registrirapparates in Bewegung setzte. Das andere Mal bildeten zwei MAREY'sche Trommeln, welche nebeneinander auf die Brust des Thieres gebunden waren, den recipirenden Theil des Apparates, welcher durch die Form- und Spannungsänderung der Muskeln beeinflusst wurde. Die eine, lateral gelegene Trommel wurde, wie MAREY annimmt, beim Niederschlage des Flügels durch die Verdickung, welche der grosse Brustmuskel bei seiner Contraction erfährt, zusammengedrückt, die andere, mehr median gelegene dagegen während der Hebung des Flügels durch die Contraction und Verdickung des Musc. subclavius, des hauptsächlichsten Flügelhebemukels. Es wurden auch beide Methoden gleichzeitig an demselben Thier in Anwendung gebracht. Später benutzte MAREY die „myographische" Methode, um die Periode der Hebung und Senkung des Flügels zu markiren, während er gleichzeitig auch die Schwankungen

des Rumpfes in seiner Bewegung registrirte (Fig. 114). Man wird aber mit Bezug darauf im Auge behalten müssen, dass die grösste Compression der Trommel doch wohl dem Stadium, in welchem die Verdickung, also die Verkürzung des anliegenden Muskels beinahe ihr Maximum erreicht hat, also mehr dem Ende des Niederschlages resp. Aufschlages, als der Mitte entspricht.

Wir haben bereits erörtert, dass MAREY die relativen Bewegungen des Flügels genauer analysirt, zerlegt und registrirt hat. Zunächst wurden an dem Schreibhebel des Registrirapparates die Bewegungen reproducirt, welche die Längslinie des Flügels macht; es ergab sich, dass die Spitze des Flügels relativ zum Rumpf eine Ellipse beschreibt (Fig. 101), und dabei in der vorderen Peripherie der Ellipse mit geringerer Geschwindigkeit niederschlägt, in der hinteren rascher aufsteigt. Die Längsaxe der Ellipse ist vorwärts abwärts gerichtet. Auffallend ist im Hinblick auf die Ergebnisse unserer eigenen Beobachtung, dass der Flügel so weit nach vorn herumgeführt wird. Auf jeden Fall sind durch die von MAREY (pg. 284 Anmkg.) zugegebene abnorme Befestigung des Thieres in vorwärts abwärts geneigter Haltung des Rumpfes abnorme Verhältnisse geschaffen. Es ist wahrscheinlich, dass ein so aufgehängtes Thier sich instinktiv aufzurichten sucht und d e s h a l b seine Flügel besonders stark im Bogen vorn herumführt. Unsere Fig. 10 ist, abgesehen von den Buchstaben, die Reproduction der Fig. 111 von MAREY. Die Linie *z z* entspricht der Längsaxe des Rumpfes, die geschlossene Curve aber der Bahn, welche ein bestimmter Punkt der Flügellängslinie parallel der Sagittalebene beschreibt. Bei *v'* ist oben, bei *z'* vorn. Die zahlreichen kurzen geraden Linien geben nach MAREY die Neigung des Flügels gegenüber der Längsaxe des Thieres in den verschiedenen Phasen der Periode. Ich habe aber bereits oben (S. 41) darauf hingewiesen, dass MAREY sich hinsichtlich der Grösse, welche er registrirte, um daraus die Planveränderung des Flügels zu beurtheilen, geirrt hat. Er glaubte die Aenderung der Tangente

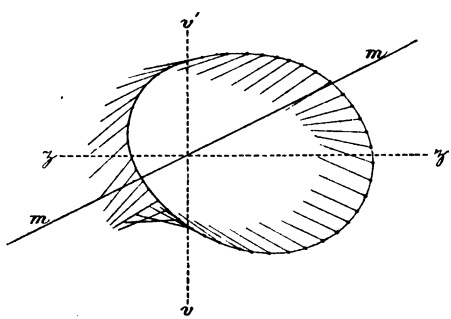


Fig. 10.

des soeben genannten Winkels zu registriren, den er vermuthlich nun berechnet und in der nebenstehenden Figur dargestellt hat. Statt dessen hat er direkt die Aenderung des Neigungswinkels der Sagittalprofile registrirt [1]).

Trotzdem und trotz einiger anderer Umstände, welche bei der Verwerthung der MAREY'schen Figur zur Vorsicht mahnen, scheint mir dieselbe den Gang der Umstellung des Flügels gut zu charakterisiren. Die rascheste Umstellung erfolgt kurz nachdem die Hebung des Flügels begonnen und bevor er die hinterste Lage zum Rumpf erreicht hat; er wird plötzlich in stärkste Supination übergeführt, welche im Lauf der Hebung und im Beginn des Niederschlages allmählig abnimmt bis auf 0, um in der Mitte und 2. Hälfte des Niederschlages in immer stärkere Pronation überzugehen, die erst mit Beginn der Hebung rasch wieder verschwindet und der Supination Platz macht. Doch kehren wir zur objectiven Berichterstattung zurück. MAREY äussert am Schluss des VI. Capitels die Meinung, dass die Planänderung des Flügels eine wesentlich passive sei. Durch den Widerstand der Luft werden beim Niederschlag die Federn hinten in die Höhe gehoben, um so mehr, je grösser die Geschwindigkeit des Niederschlages ist; am Ende des letzteren wird der Widerstand plötzlich = 0,

---

[1]) Die Richtung mm', 30^0 mit zz' bildend, wäre (laut Anmerkg. 1. pg. 273) diejenige Richtung der Flügelebene, für welche der Schreibhebel, der durch den Stiel des Cardanus in Bewegung gesetzt war, in der Ausgangsstellung sich befand. Wollen wir aus den MAREY'schen Messungen für unsere Zwecke die wirkliche Abänderung der Neigungsänderung, welche das Sagittalprofil des Flügels bei diesem Versuche zeigte, ermitteln, so müssen wir berücksichtigen, dass bei der Berechnung der Winkel in der MAREY'schen Figur aus ihren angeblichen Tangenten die Differenzen bei den von mm' weniger abweichenden Neigungen grösser, bei den am meisten davon verschiedenen Neigungen aber kleiner geworden sind. Jedenfalls möchte ich auf Grund eigener Beobachtungen annehmen, dass im Allgemeinen der Betrag der Umstellung des Sagittalprofiles des Flügels kleiner ist, als der Neigungsänderung jener kurzen Linien der MAREY'schen Figur entspricht. Es würde ja sonst die maximale Supinationsstellung dieses Profiles von der maximalen Pronationsstellung um 90^0 divergiren, was bei freiem Fluge mit nicht zu sehr eingeschränkter Horizontalgeschwindigkeit wohl nicht vorkommt, höchstens vielleicht bei steilem Aufsteigen, oder beim Flattern über derselben Stelle. Es ist klar, dass bei den MAREY'schen Versuchen wegen der nicht unerheblich gehinderten Horizontalgeschwindigkeit sowohl Supination als Pronation grösser sein konnte und sein musste.

die Federn kehren plötzlich in ihre gewöhnliche Gleichgewichtslage zurück und verbleiben in derselben während der Hebung. Dass die Flügelspitze beim Niederschlag einen nach vorn convexen Bogen beschreibt, ist nach MAREY ein Ausgleiten des schräg zur Richtung der niedertreibenden Kräfte gestellten Flügels nach der Seite der bei der Bewegung gegen die Luft vorangehenden vorderen Kante, während das Ausweichen nach hinten bei der Hebung durch den Widerstand der Luft bedingt sein soll, welchen der supinirte und mit dem Körper horizontal vorwärts bewegte Flügel an seiner Unterfläche bei der Hebung erzeugt. Die Muskeln an sich würden den Flügel bloss in einer Ebene, und ohne ihn um die Längsaxe zu drehen, hin und her bewegen (pg. 274). Bei der Mehrzahl der Vögel, namentlich bei den grossen Arten scheint der Flügel während der ganzen Zeit ausgestreckt zu bleiben (pg. 220).

Im VI. und letzten Capitel seines Buches beschäftigt sich MAREY mit den Oscillationen des Rumpfes; er unterscheidet verticale Schwankungen und horizontale, welch' letztere sich in periodischer Zu- und Abnahme der horizontalen Geschwindigkeit äussern. Auch diese Bewegungen suchte M. zu registriren. Er befestigte zur Untersuchung der verticalen Schwankungen eine scheibenförmige Trommel flach auf den Rücken des Thieres; die freie Breitseite war durch eine elastische Membran gebildet und in der Mitte mit einer Bleimasse beschwert. Durch einen Schlauch communicirte der mit Luft erfüllte Hohlraum der Trommel mit demjenigen einer zweiten ebenso beschaffenen, deren Blei mit dem Schreibhebel befestigt war. Sank in der Trommel A das Blei tiefer, so musste es sich in der Trommel B heben und umgekehrt. M. ist nun der Meinung, dass wenn die Trommel A abwärts bewegt wird, ihr Blei zurückbleibt, so dass dann in der zweiten Trommel die Bleimasse sich einsenken muss; bei der Hebung der Trommel A soll ihr Blei sinken. Dem Sinken des Rumpfes entspreche also eine relative Senkung des Bleis der zweiten und des Schreibhebels, dem Aufsteigen des Rumpfes ein relatives Aufsteigen des Schreibhebels. Die Richtigkeit dieser Annahme kann nun nicht ganz ohne weiteres zugegeben werden. Bei der Ruhelage der Trommel und des Bleis hält der Druck D der Membran nach oben dem Gewicht P des Bleis das Gleichgewicht, $P = D$. Bewegt sich die Trommel mit irgend einer Beschleunigung der Geschwindigkeit $= \varphi$, so folgt das Blei nur dann dieser Bewegung, wenn die auf dasselbe einwirkende Kraft ihm

ebenfalls eine Beschleunigung φ ertheilt. Beginnt und wächst die Abwärtsbewegung der Trommel, so muss zu diesem Ende $P > D$ sein, was nur der Fall ist, wenn das Blei gegenüber der Ausgangsstellung relativ gehoben ist. Bei der Aufwärtsbewegung der Trommel muss $D > P$, das Blei also tiefer in die Trommel eingesunken sein; so entspricht jedem Beschleunigungszustand der Trommel eine ganz bestimmte relative Stellung des Bleis, dem Moment der maximalen Abwärtsbeschleunigung (welche ungefähr beim höchsten Stand der Trommel und des Rumpfes vorhanden sein mag) die maximale Excursion nach oben, der maximalen Aufwärtsbeschleunigung der Trommel (bei ihrem tiefsten Stande) die extreme Senkungsstellung des Bleis. Nun erwirbt sich freilich das Blei, indem es periodisch von einer Gleichgewichtsstellung zur nächstfolgenden übergeht, eine relative Geschwindigkeit, vermöge deren es über die jeweilen passenden Gleichgewichtslagen hinausschwingt, worauf dann für den nächsten Moment ein entgegengesetzter Fehler zu Stande kommt; es macht also das Blei Nebenoscillationen. Es mag gelingen, dieselben für einen bestimmten concreten Fall möglichst zu vermeiden durch bestimmte Grössen und Spannungsverhältnisse der Membran etc., oder doch zu bewirken, dass es sich um eine fast gleichmässige Verschiebung aller Phasen handelt; es kann aber dann unmöglich dasselbe Instrument in einem zweiten Fall, wo die Bedingungen der Bewegung der Trommel andre sind, ebenfalls mit derselben Regelmässigkeit spielen. Berücksichtigt man dies, so wird man verstehen, warum MAREY bei dem einen Versuchsthier zwei einzige regelmässige Schwankungen pro Periode, bei andern dagegen eine ganze Menge verschiedener Schwankungen der Stellung des Bleigewichtes registrirt hat [1]) Wir kommen also

[1]) Es ist zum mindesten wahrscheinlich, dass nicht alle diese Schwankungen wirklichen verticalen Oscillationen des Rumpfes entsprechen, auch müssen wohl die Zeitpunkte dieser Schwankungen etwas anders beurtheilt werden, als dies durch MAREY geschieht. Erstens entsprechen in Fig. 114 den Erhebungen der ersten und dritten Curve, welche mit der von uns beschriebenen myographischen Methode gewonnen sind, nicht die Mitten der relativen Flügelhebung und des relativen Flügelniederschlages, sondern eher die Endtheile; sodann aber entsprechen die oberen Gipfel der Curven 2 und 4, wo es sich wahrscheinlich in der That um Oscillationen des Rumpfes handelt, nicht den höchsten Lagen des Rumpfes, sondern den Augenblicken, in welchen der Rumpf die grösste relative Beschleunigung nach oben erfährt, (indem ja das Blei der zweiten Trommel die Bewegung desjenigen

zu der Ueberzeugung, dass die Schlüsse, welche MAREY aus seinen Experimenten mit Bezug auf die „Reactionen" des Rumpfes zieht, mit Vorsicht aufgenommen werden müssen.

Im letzten Abschnitt seines Buches erörtert MAREY zusammenfassend seine „Theorie des Fluges". Nach ihm haben STRAUS-DÜRCKHEIM und LIAIS die BORELLI'sche Theorie vervollständigt. Die Sachlage ist genauer gesagt die, dass alle drei den Flügel beim Niederschlag in pronirter Stellung gegen die Luft gehen und einen aufwärts vorwärts gerichteten Luftwiderstand erzeugen lassen. Bei der Hebung geht der Flügel nach BORELLI mit der schmalen Kante, nach STRAUS-DÜRCKHEIM dagegen schräg, sowohl mit der Vorderkante als mit der dorsalen Breitseite voran gegen die Luft. LIAIS aber stellte die Ansicht auf, dass in Folge der horizontalen Vorbewegung des Vogels bei der Hebung des Flügels die Unterseite desselben sich in supinirter Stellung wie ein Drachen gegen die Luft bewege. Dieser letzten Auffassung nun schliesst sich MAREY, natürlich nur für die Vögel, an. Nach LOUVRIÉ soll diese Drachenwirkung, d. h. die Umwandlung von horizontaler Geschwindigkeit in Auftrieb am vortheilhaftesten vor sich gehen können, wenn die Drachenfläche nur ganz wenig ($6\frac{1}{2}^0$) supinirt sei.

Auch die Verbreiterung der Flügelbasis bei den Vögeln gegenüber ihrer Schmalheit bei den Insecten stehe in Beziehung zu dieser Wirkung. MAREY nennt deshalb den basalen Theil des Flügels den passiven und nimmt an, dass er auch noch während des Flügelniederschlages, da er sich ja verhältnissmässig wenig senkt, in der angedeuteten Weise wirke. Die äusseren Abschnitte des Flügels dagegen, die zugleich mit dem locomotorischen Impuls nach oben Vorwärtsgeschwindigkeit erzeugen, bezeichnet er als activen Theil.

Mit der Synthese des Fluges der Vögel hat sich, wesentlich

---

der ersten in umgekehrtem Sinn wiederholt). Das sind nun ungefähr die Phasen, in welchen der Rumpf seine tiefste Lage hat. Solches wird namentlich der Fall sein bei langsamen Oscillationen.

Wir würden also aus der 3. und 4. Curve, welche von einem Weih gewonnen sind, den Schluss ziehen, dass der Rumpf ungefähr während der Mitte der relativen Abwärtsbewegung des Flügels seine tiefste Lage hat. Das ist freilich gerade das Umgekehrte von dem, was MAREY geglaubt hat annehmen zu müssen, stimmt aber mit dem Resultate unserer theoretischen Erwägungen.

in Uebereinstimmung mit den Ansichten von MAREY und unterstützt von letzterem TATIN befasst [1]). Mit ungenügenden theoretischen Vorkenntnissen ausgestattet, verbrauchte dieser Autor seine ausserordentliche Ausdauer und sein grosses technisches Geschick ohne entsprechend nennenswerthen Erfolg. TATIN ist mit Recht der Meinung, dass bei grossen Vögeln nicht bloss die Planveränderung des Flügels im Ganzen, sondern auch die Drehung der Flächen der einzeln vorstehenden grossen Federn aus der Flügelebene heraus Berücksichtigung verdiene. Er unterstützt MAREY's oben berührte Vorstellungen über den activen und passiven Theil des Flügels, sucht aber in seiner letzten Arbeit — ohne dass ihm der Beweis gelingt — darzuthun, dass die Hebung des Flügels passiv, bloss durch den auftreibenden Widerstand der Luft zu Stande gebracht werde.

Zusammenfassung.

Wie man aus dem Mitgetheilten sieht, lauten nicht bloss die Meinungen über die beim normalen Horizontalfluge wirksamen äusseren Kräfte sehr verschieden, es ist nicht bloss häufig übersehen worden, dass man zur Beurtheilung der erzeugten Luftwiderstände von der absoluten Bewegung der Oberflächen ausgehen muss und dass die Kenntniss der relativen Bewegung des Flügels zum Rumpfe dazu nicht genügt — es herrschen auch über die Art dieser relativen Bewegung selbst die allerverschiedensten Ansichten.

Nach BORELLI, ZACHARIAE, STRAUS-DÜRCKHEIM, PRECHTL u. a. geschieht der Niederschlag perpendiculär, d. h. in einer verticalen Querebene der Schultergelenke, nach (GREW, DESLANDES), BARTHEZ, d'ESTERNO, GIRAUD-TEULON, MOUILLARD, R. OWEN, (MACGILLIVRAY, BISHOP), LIAIS, BREHM u. a. von oben vorn nach hinten unten; nach PETTIGREW und MAREY schräg vorwärts abwärts. Nach d'ESTERNO und MAREY beschreibt beim Niederschlage die Flügelspitze die vordere Langseite einer Ellipse, bei der Hebung

---

[1]) V. TATIN, Expériences sur le vol mécanique. Phys. expér. Travaux du Laboratoire de M. MAREY, 2. année, 1876. III.

— Expériences physiologiques et synthétiques sur le mécanisme du vol.

Ebenda. Jhgg. 1877.

— Recherches et expériences sur le mécanisme du vol des oiseaux.

Ebenda. Bd. 1878/79.

die hintere. PETTIGREW scheint anzunehmen, dass sie relativ zum Rumpfe auch beim fortschreitenden Fluge eine Achtertour beschreibt.

Nach BARTHEZ, J. MÜLLER, PRECHTL, GIRAUD-TEULON, PETTIGREW wird der Flügel bei der Hebung eingezogen, nach PRECHTL vollständig, nach BARTHEZ um so mehr, je langsamer die Flügelschläge erfolgen, nach PETTIGREW in unvollständiger Weise.

Nach BORELLI, ZACHARIAE, d'ESTERNO, MAREY, TATIN bleibt überhaupt, nach MAREY wenigstens bei den grösseren Fliegern der Flügel auch bei der Hebung ausgestreckt.

ZACHARIAE, PRECHTL, GIRAUD-TEULON, d'ESTERNO sind der Meinung, dass der Flügel des Vogels beim Niederschlage im Ganzen weder pronirt noch supinirt sei; BORELLI, STRAUS-DÜRCKHEIM, J. MÜLLER, MAREY, TATIN u. a. nehmen an, dass er in pronirter Stellung abwärts schlage. Nach MAREY und TATIN gilt dies nur für die äusseren Theile des Flügels, nach TATIN ist die Pronation besonders stark an den freien Enden der Schwungfedern.

PRECHTL vertritt die Meinung, dass der vordere Rand des Flügels jederzeit eine pronirte Unterfläche darbiete, PETTIGREW aber behauptet, es sei der niederschlagende Flügel supinirt.

Nach BORELLI, ZACHARIAE, STRAUS-DÜRCKHEIM, GIRAUD-TEULON, d'ESTERNO, PETTIGREW, KRARUP-HANSEN, MAREY u. a. wird der Flügel bei der Hebung supinirt. Einige (BORELLI, GIRAUD-TEULON etc.) nehmen an, dass er dabei mit der scharfen Kante voran die Luft durchschneide, nach ZACHARIAE, STRAUS-DÜRCKHEIM, KRARUP-HANSEN geht er zugleich mit der Dorsalseite voran gegen die Luft, nach d'ESTERNO, LIAIS, MAREY, TATIN wirkt der Ueberdruck der Luft auf die Unterfläche, nach PETTIGREW auf beide zugleich.

Da ist, wie man zugestehen wird, von einer erfreulichen Uebereinstimmung keine Rede. Leider schliessen selbst die Ergebnisse, welche MAREY mit seiner Registrirmethode erhalten hat, nicht so vollkommen jeden Einwand und jeden Zweifel aus, dass nach ihnen alle diese Streitfragen entschieden werden könnten. Sicher liegt das Richtige manchmal nicht bloss auf einer Seite.

Unter diesen Umständen wird man doch noch solchen Beobachtungen, die ohne künstlichen Registrirapparat aber streng nach den von uns oben aufgestellten Gesichtspunkten am eingespannten sowie an frei und ungehindert fliegenden Vogel angestellt sind,

Gewicht beilegen müssen, und stehe ich deshalb nicht an, meine eigenen Erfahrungen im Folgenden mitzutheilen.

D. Eigene Beobachtungen über die Form der Bewegung.

Vor Jahren schon, namentlich aber im Juni 1884, beobachtete ich gefangene Cypselus apus, die ich in eine kleine Weste steckte und damit an einer Schnur direkt oder vermittelst eines flachen Bogens aus Kautschukschlauch aufhing. Ich liess das Thier mit der Schnur wie ein Pendel schwingen und beobachtete die beim Vorschwung ausgeführten relativen Flügelbewegungen, am Ende des Vorschwungs hielt sich das Thier oft längere Zeit durch Flügelschläge fast stationär; ich verrückte auch den Aufhängepunkt der Schnur in der Richtung, in der das Thier weiter strebte, langsam oder schnell. Die Thiere waren abgemattet und bewegten ihre Flügel verhältnissmässig langsam.

Bei fast ganz gehinderter Vorbewegung des Thieres schlugen beide Flügel in annähernd einer und derselben, im allgemeinen etwas vorwärts abwärts gerichteten Ebene. Die Flügelspitze beschrieb eine Achtertour, deren obere Schleife fast zu einer Linie verschmälert war, die untere Schleife wurde von vorn nach unten und hinten herum durchmessen; die Flügelspitze bewegte sich also am Ende des Niederschlages deutlich etwas nach hinten. Am Ende des Niederschlages war der Flügel gestreckt nach unten und etwas nach hinten geführt. Der Niederschlag geschah deutlich vorwärts abwärts, in pronirter Stellung; namentlich war der lange von den Schwungfedern gebildete mittlere und äufsere Theil des Flügels deutlich pronirt. Unerwarteter Weise fand sich, dass die Pronation im Anfang (1. Hälfte) des Niederschlages grösser war als gegen das Ende, doch gilt dies letztere vielleicht nur für die Fälle, wo das Thier nicht nur vorwärts, sondern auch stärker aufwärts zu kommen suchte.

Der Flügel wurde im Beginn der Hebung etwas, aber nur ganz wenig eingezogen und gegen das Ende der Hebung hin wieder vollständig ausgestreckt. Die Dorsalfläche des Flügels war bei der Hebung deutlich rückwärts gerichtet (supinirt), besonders aber die Ebenen der grossen Schwungfedern; auch waren dabei die Ebenen der verschiedenen Schwungfedern von einander

abstehend, so dass vorwärts aufwärts gerichtete Lücken zwischen ihnen entstanden. Die Orientirung der Federbärte wurde durch Aufkleben eines kleinen hellen Papierstückes deutlich gemacht.

Bei rascherem Vorwärtsfliegen beschrieb die Flügelspitze zum Rumpf nicht mehr die schmale oben beschriebene Achtertour, sondern eine mehr gerundete, d. h. ovale, oben spitzere, unten breitere Figur; die Aenderung der Neigung der Sagittalprofile war dann nicht mit Sicherheit zu verfolgen. Doch constatirte ich deutlich die mit dem Niederschlag verbundene Pronation. An einem stark ermüdeten Thiere schätzte ich die Zahl der dabei stattfindenden Flügelschläge pro Secunde auf 8—10. An frei fliegenden nicht erschöpften Thieren kommen sicher mindestens 16 Flügelschläge auf die Secunde. Die Bewegung der Flügel ist dann kaum zu verfolgen; besonders auffallend ist bei sehr grosser Vorwärtsgeschwindigkeit des Thieres die fuchtelnde Bewegung des Flügelendes, die sicher durch eine deutliche Rückwärtsbewegung der Hand am Ende des Niederschlages ausgezeichnet ist, die ich aber allemal nur dann einigermassen klar verfolgen konnte, wenn ich mir die Rückbewegung mit einer deutlichen Pronation, den ersten Moment der Hebung aber mit einer Supination und Streckung combinirt dachte.

Bei Betrachtung von hinten scheint der äussere Theil des Flügels ganz ähnlich auf- und abzuschlagen, wie ein Fischschwanz von einer Seite zur andern schlägt. Für die rasche Vorwärtsbeschleunigung ist eine vermehrte relative Rückführung des Flügels und namentlich der Schwinge, also eine Vergrösserung des horizontalen Schlagwinkels, für das aktive Emporsteigen durch Flügelschläge dagegen die Vergrösserung des verticalen Schlagwinkels charakteristisch.

Hausschwalben. Es ist ungemein schwer, durch Beobachtung über die relativen Bewegungen der Flügel bei diesen kleinen lebhaften Thieren und ihren nächsten Verwandten ins Klare zu kommen. Man kann Stunden lang beobachten, ohne zu einem nennenswerthen Resultate zu kommen. Man muss sich nothwendigerweise darauf beschränken, irgend einen bestimmten Umstand der Bewegung feststellen zu wollen, abwarten, bis das Thier sich in einer für die Beobachtung besonders günstigen Stelle und in günstiger Richtung darbietet und alle andern unter weniger günstigeren Verhältnissen gewonnenen Bilder vergessen und unterdrücken. Ja man muss bei den blitzschnell ablaufenden Bewegungen

seine Aufmerksamkeit auf eine einzige Phase der Bewegung concentriren und die wiederkehrenden Eindrücke sich summiren lassen.

Solches gilt auch noch für viel weniger kleine Thiere, wie z. B. für die Tauben. Da aber die Fähigkeit, solche flüchtige und rasch sich folgende Eindrücke deutlich und scharf aufzufassen, individuell sehr verschieden ist und nicht bloss von der methodischen Uebung, sondern auch von der natürlichen Anlage des Nervensystems abhängt, so zweifle ich nicht, dass geeignete Beobachter, welche sich diesem Gegenstande widmen würden, viel mehr Erfolg haben könnten, als ich.

Sicher geht bei der Hausschwalbe bei langsamem horizontalen Fluge, wenn die vorwärts treibende Wirkung des Flügelschlages nur klein zu sein braucht, der Flügel fast als starres Ganzes, ausgestreckt auf und ab, ohne dass jemals die Schwungfedern auseinanderklaffen. Die Spitze befindet sich zu Anfang des Niederschlages hinter einer verticalen Querebene durch die Schultergelenke, der Schlag geschieht abwärts und etwas vorwärts; am Ende des Niederschlages befindet sich die Spitze wieder etwas nach hinten von den Schultergelenken.

Der Flügel wird also bei der Senkung allmählich etwas abducirt, und nur am Schluss findet eine Adduction des Flügels, vornehmlich aber der Schwinge statt; dieselbe ist aber bei langsamem Fluge sehr gering. Bei schnellerem Fluge erfolgt regelmässig eine stärkere Rückführung des Flügels und namentlich der Hand, sie kann viel stärker werden, als dies jemals bei Krähen, Störchen etc. der Fall ist (s. unten).

Eine Längsrotation des Flügels scheint bei dem langsamen Fluge kaum stattzufinden; der Flügel erscheint wenig und gleichmässig supinirt, nur beim Niederschlag vermindert sich gegen die Spitze des Flügels hin die Supination und macht sogar bei einigermassen energischerem Vorwärtsstreben des Thiers einer geringen aber deutlichen Pronation Platz. Es schien mir, als ob diese Pronation bei geringer Horizontalgeschwindigkeit nicht am Ende, sondern in der ersten Hälfte des Niederschlages am grössten sei; bei rascher Vorwärtsbewegung dagegen kann möglicherweise die grösste Pronation mit der Rückführung am Ende des Niederschlages zusammenfallen.

Marey beobachtete [1]) im Hafen des goldenen Horns bei Con-

[1]) Physiologie expérim. Travaux du laboratoire de M. Marey. 1875 No VI. pg. 215 ff.

stantinopel grosse Möven (goelands) und fand, so oft der Vogel in gleichem Niveau mit dem Beobachter war und sich direkt von ihm entfernte, dass der Flügel als Linie erschien, und nur von der Kante sichtbar war. Einzig die Spitze des Flügels ward zeitweise breiter und zwar mit dem Niederschlage des Flügels.

Bei von oben fallendem Sonnenlicht erschien die Verbreiterung dunkel; es war also sicher, dass die beschattete Unterfläche des Körpers sich bei dem Niederschlage etwas rückwärts wendete. Stand der Beobachter höher als der Vogel, so sah man im allgemeinen die Oberfläche des Flügels als schön beleuchteten Streifen, der aber beim Niederschlag unsichtbar wurde resp. zu einfacher Linie sich verkürzte.

Ich selbst habe bei Möven dieselbe Beobachtung wiederholen können. Besonders deutlich aber lässt sich die Pronation des Flügels bei Krähen erkennen, welche gleichmässig horizontal dahinziehen und sich dabei von dem annähernd im gleichen Niveau befindlichen Auge des Beobachters direkt entfernen. Die Längsaxe des Rumpfes bildet dabei, wie Betrachtung von der Seite lehrt, mit der Horizontalebene einen Winkel von 5 bis höchstens 10°, der sich nicht wesentlich ändert. Die verticalen und horizontalen Oscillationen des Rumpfes sind kaum zu constatiren. Der Flügel bleibt auch bei der Hebung annähernd ausgestreckt, abgesehen von der gleich zu besprechenden Einziehung der Schwinge. Die Sagittalprofile der Flügelebene als Ganzes werden bei der Hebung kaum so stark supinirt, dass sie der Längsaxe des Rumpfes parallel laufen.

Wenn sich das über uns hinwegfliegende Thier bereits in grosser Entfernung befindet, so erscheint der Rumpf zu einem rundlichen Fleck und der Flügel zu einer feinen Linie verkürzt, die in ihrer Dicke wenig ändert. Nur beim Niederschlage und zwar nachdem die Waagehalte passirt ist, sieht man diese Linie an ihrem äusseren Ende sich deutlich verbreitern und auch alsbald an der Spitze sich aufbiegen (siehe Fig. 11 *A*). Aber auch im Moment, während der Vogel direkt über uns war, konnte man die Pronation der Schwinge am Ende des Niederschlages constatiren. Zugleich sah man aber, wie die einzelnen Schwungfedern beim Niederschlage kammartig auseinander gespreizt werden und wie jede einzelne Schwungfeder stärker pronirt ist als die Fläche des von ihnen gebildeten Kammes im Ganzen. Bei der Hebung des Flügels rücken die Strahlen des Kammes an einander, und

jeder einzelne zeigt sich dann umgekehrt stärker supinirt, als die Fläche des Kammes im Ganzen es ist.

Steht der Beobachter vor oder hinter dem Thier, so sieht er wesentlich nur eine Auf- und Niederbewegung des Flügels (der verticale Schlagwinkel kann über der Horizontalebene durch die Schulter 40—45°, unter derselben 30—35° betragen, ist aber oftmals geringer). Beobachtet man aber von der Seite, so erkennt man bei einiger Uebung deutlich, dass die Spitze des Flügels (relativ zum Körper) eine geschlossene Figur beschreibt, deren höchster Punkt in der Querebene des Schultergelenkes oder nach hinten davon liegt. Von da aus geht das Flügelende abwärts und dabei etwas vorwärts bis fast zum Schluss des Niederschlages (Fig. 11 *B*), dann aber rasch mehr und mehr direkt abwärts und zuletzt abwärts rückwärts. Erst wenn die Spitze hinter der Querebene der Schulter sich befindet, beginnt ihre relative Hebung in einer schwer genau zu bestimmenden Bahn. Doch ist unzweifelhaft mit dem Ende der Hebung eine ausgiebige Vorführung verbunden, da nothwendig im Beginn der Hebung die Spitze noch rückwärts gehen musste; es handelt sich also um eine geschlossene, elliptische Curve, deren Längsaxe fast senkrecht, oben allerdings etwas zurück steht. Die Breite wechselt und kann so gross werden, dass die Curve fast einer Kreislinie nahe kommt. Die untere Schmalseite ist immer etwas abgeplattet und zwar so, dass am hinteren Ende dieser Abplattung der schärfere Winkel entsteht.

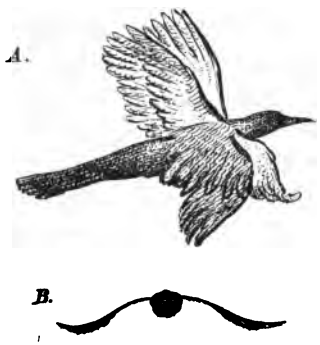


Fig. 11.

Die Beobachtung von unten bestätigt auf das unzweifelhafteste, dass am Ende des Niederschlages oder im Beginn der Hebung (beide Perioden sind hier nicht genau gegeneinander abzugrenzen) der Flügel rückwärts geführt wird, und zwar zunächst als Ganzes, also auch mit seinen basalen Theilen, dann aber wirklich auch durch eine geringe Einziehung der Schwinge (Beugung der Hand). Für gewöhnlich, bei langsamem Fluge in ruhiger Luft, ist diese Einziehung nicht erheblich. Wenn die Thiere aber rascher fliegen, geht einmal der ganze Flügel stärker nach hinten, so dann aber ist die Beugung des Handgelenkes eine ausgiebigere. Beides kann so weit gehen, dass die Längslinie der Schwinge bei

der Betrachtung von unten mit derjenigen des Rumpfes einen Winkel von 45° zu machen scheint. Deutlicher ist im Ganzen die Adduction des Flügels bei der Schwarzkrähe, namentlich aber bei der Dohle, die im übrigen bei ruhigem Ruderfluge sich ähnlich verhält wie die Nebelkrähe.

In der Regel schätzte ich die Zahl der Flügelschläge bei der Nebelkrähe auf $4\frac{1}{2}$ pro Sekunde. Es gelang mir einmal, die dabei vorhandene Horizontalgeschwindigkeit (bei ruhiger Luft) auf 7 Meter pro Sekunde annähernd zu bestimmen.

Der Flügel des Storches ist nach ähnlichem Typus gebaut und wird ähnlich bewegt, wie derjenige der Krähe. (Typus der Ruderflügel Prechtl's). Beim Storch wie bei dem Weih, Bussard, Geier, Adler sind die Ausschnitte an den Schwungfedern besonders deutlich (vergl. S. 31) und die verschmälerten äusseren Theile der Fahnen besonders stark asymmetrisch. Jedem, der jemals einen Storch über sich hat dahinschweben sehen, ist sicher das eigenthümliche Auseinanderspreizen der Schwungfedern aufgefallen. Hält sich das Thier dabei in demselben Niveau oder steigt es sogar, so ist die Fläche des ganzen Flügels deutlich etwas nach vorn gewendet. Immer aber sind die einzelnen Schwungfederfahnen aus dieser Ebene in pronatorischem Sinn herausgedreht. Dies ist ein Effekt des auf die Unterseite des Flügels wirkenden Luftwiderstandes, indem die blosse Ausstreckung des Flügels am todten Thier in allen seinen Gelenken niemals zu einem derartigen Verhalten Veranlassung giebt.

Auch wenn ein Storch mit regelmässigen Flügelschlägen über den Beobachter horizontal hinwegfliegt, zeigt das Flügelende das Bild des Kammes mit nach aussen divergirenden und aus der Hauptebene des Flügels pronatorisch herausgedrehten Strahlen, und zwar beim Niederschlage; es liegen die Sagittalprofile der ganzen Flügelfläche dabei stets anscheinend horizontal, die Schwinge erscheint im Ganzen kaum pronirt, die Hinterränder der einzelnen isolirten Schwungfedern aber liegen höher als die vorderen.

Der Niederschlag des Flügels erfolgt vorwärts und abwärts, nahezu beiderseits in einer und derselben Ebene, welche durch die beiden Schultergelenke gelegt ist. In diese Ebene gelangt zuerst nur der basale, dem Oberarm und Vorderarm entsprechende Theil, bald aber auch die Schwinge hinein, so dass dann der Flügel in fast maximaler Ausstreckung niederschlägt. Gegen das Ende der Senkung verlässt er als Ganzes diese Ebene, uud bewegt sich mehr direkt abwärts, zuletzt abwärts rückwärts. Erst

ganz zuletzt kommt noch eine geringe Einziehung der Schwinge hinzu, wobei die Spreizung der Federn ab-, ihre Pronation aber zunimmt.

Betrachtet man einen Storch unter günstigen Umständen, fast auf gleicher Höhe mit ihm, von hinten, so kann man die Planveränderungen des Flügels im Ganzen besser beurtheilen. Sie sind allerdings verhältnissmässig gering. Man erkennt, dass der Flügel bei der Hebung ein wenig supinirt ist. Im Beginn des Niederschlages vermindert sich die Supination an den mittleren und äusseren Theilen des Flügels ganz wenig, wenn aber die Flügel die Horizontalebene passirt hat, verbreitert sich das äussere Drittel des Flügels, die dunkle Unterseite kommt zum Vorschein. Es handelt sich wohl nicht bloss um eine Pronation der einzelnen Schwungfedern, sondern um eine geringe Pronation der Handfläche im Ganzen (mit gleichzeitiger Rückführung). Bei der Hebung des Flügels erfolgt natürlich eine supinatorische Umstellung der Schwungfedern, über deren Grösse ich aber durch Beobachtung nichts Sicheres ermitteln konnte.

Die Hebung erfolgt rasch, der Flügel wird nicht weiter eingezogen, ist also fast vollständig gestreckt; die Spitze geht möglichst direkt nach oben, bleibt also zunächst hinter der verticalen Querebene durch das Schultergelenk und schiesst erst gegen Ende der Hebung nach vorn; während der Flügel allmählig von der relativen Hebung zur Niederbewegung übergeht, erreicht er seine maximale Streckstellung.

Beim Niederschlage verbiegt sich der ganze langgestreckte Rumpf in eigenthümlicher Weise derart, dass die Brust gegenüber dem Hals und Kopf einerseits, dem Bauch und Schwanz andererseits etwas in die Höhe geht.

Die Zahl der Flügelschläge schätzte ich auf nicht ganz 2 pro Sekunde, die zugehörige Geschwindigkeit ist kaum viel grösser, als die oben für die Krähe angeführte; doch habe ich keine Gelegenheit zur genauern Bestimmung gefunden.

Die Flügel der Tauben stellen eine Mittelform dar zwischen den eigentlichen Ruderflügeln (Storch, Geier) und den eigentlichen Schnell- oder Stossflügeln (wie wir sie z. B. bei den Möven beobachten). Von den Ruderflügeln kommen ihnen diejenigen der Krähen und noch mehr der Dohlen nahe, welche Thiere ja zu Zeiten, statt ruhig und gleichmässig dahinzustreichen, in den kühnsten Evolutionen sich ergehen und mit dem Thurmfalken ein wildes Spiel treiben. Auch der Kibitz kann seinen Flügel

bald als schönen Ruderflügel, bald als Stoss- oder Schnellflügel zu den verschiedensten Wendungen und Gaukeleien benutzen.

Ueberhaupt bewegen die Tauben ihren Flügel je nach Umständen in ganz verschiedener Weise. Manchmal fliegen sie weite Strecken hin in gerader Linie, mit regelmässigen Flügelschlägen, offenbar ohne sich erheblich grosse neue Impulse nach vorn zu geben, indem sie nur dafür sorgen, in derselben Höhe zu bleiben. Der Flügel bewegt sich dann fast wie eine steife Platte in etwas supinirter Stellung und unter geringer Excursion auf und ab. Es ist möglich, dass der vordere Rand der Schwinge und die einzelnen Schwungfedern ihre Unterflächen beim Niederschlag um ein Minimum nach hinten gewendet haben; aber die Sagittalprofile des Flügels im Ganzen sind auch an der Hand noch etwas supinirt, wenn auch unmerklich und weniger als die basalen Theile des Flügels. Die Flügelspitze geht beinahe in einer und derselben Ebene, die von oben nach unten und kaum etwas nach vorn gerichtet ist, auf und ab, oder beschreibt eine nur ganz schmale Ellipse.

Bei rascherem horizontalem Flug erfolgt der Niederschlag zunächst ebenfalls abwärts und etwas vorwärts, aber gegen Ende des Niederschlages bewegt sich die Flügelspitze mehr direkt abwärts und dann deutlich nach hinten, Letzteres um so mehr, je rascher die horizontale Verschiebung des Ganzen ist. Diese Rückführung geschieht z. Th. durch Adduction des ganzen Flügels, so dass auch der Carpus sich rückwärts bewegt, namentlich aber durch Beugung der Hand. Bei der Hebung wird der Flügel nicht stärker eingezogen, sondern beginnt im Gegentheil alsbald sich zu strecken. Gegen Ende des Rückschlages ist allerdings die Streckung der Hand und die Vorführung des ganzen Flügels am bemerkbarsten. So zeigt sich auch bei den Tauben ähnlich wie bei den Krähen bei rascherem Fluge ein deutliches Herumwirbeln der Flügelspitze, wenn man das Thier von der Seite her betrachtet. Bei reissendem Fluge, z. B. wenn die Thiere im Schwarm um die Wette fliegen, oder rasch die Strassen entlang dahinjagen, geschieht die Rückführung der Schwinge mit ausserordentlicher Energie, ruckweise. Es scheint ferner der Flügel von der Basis zur Spitze hin stärker abwärts concav und insbesondere das Handskelet möglichst ventralwärts aus der Ebene der proximalen Theile des Flügels abgebogen zu sein. Wie die Sagittalprofile der Schwinge im Ganzen sich verhalten, ist schwer zu beurtheilen. Doch sind sie sicher beim Niederschlag etwas pronirt. Die Spreizung

der Schwungfedern ist gering, und doch werden die Kiele bei energischem Hieb der Schwinge nach hinten nicht einfach senkrecht zur Fläche aufgebogen, sondern gegen den vordern, nunmehr äusseren Rand der Schwinge hin, was ebenfalls für eine deutliche pronatorische Längsdrehung der Federn spricht[1]). Der Handfittich wird oft so weit zurückgeführt, dass seine Längslinie der Längsachse des Körpers fast parallel steht. Ganz konstant ist die starke Rückführung der Schwinge mit einer stärkeren Beugung des Ellenbogengelenkes verbunden, ja es wird bei reissendem Fluge dieses Gelenk überhaupt nicht ad maximum gestreckt. Diese Beugung des Ellbogens gestattet bekanntlich eine stärkere Beugung und überhaupt eine grössere Beweglichkeit der Hand und versteht sich daher sehr leicht. Ich will zum voraus bemerken, dass ich diese Rückführung der Hand nicht als eine Bewegung auffasse, welche nur die Hebung und Vorführung des Flügels erleichtern soll; vielmehr dient sie dem Niederschlag und modificirt ihn; aber die absolute Bewegung der Flügelflächen rückwärts gegen die Luft ist der Ausgiebigkeit der relativen Rückbewegung von Flügel und Hand nicht einfach proprotional. Vielmehr muss bei zunehmender horizontaler Geschwindigkeit die Rückführung des Flügels besonders rasch zunehmen.

Diese Verhältnisse sollen später noch eingehender besprochen werden.

Möven, die ich an der Oder bei Breslau oft zu beobachten Gelegenheit hatte, zeigten die schon von MAREY namhaft gemachte deutliche Pronation der Schwinge zu Ende des Niederschlages. Es handelte sich dann wohl auch gleichzeitig um eine deutliche Rückführung des Flügelendes, d. h. namentlich der Schwinge, und um einen wirksamen Vorwärtsimpuls.

Man sieht aber oft diese Thiere, ohne dass sie rasch vor-

---

[1]) Die Kiele sind in ihrer natürlichen Form dorsalwärts und gegen den vorderen Rand der Schwinge hin convex gekrümmt, werden also zunächst gestreckt und dann erst umgekehrt überbogen. Schon die natürliche Form und Einfügung lässt also erkennen, dass sie nicht bloss durch Kräfte senkrecht zur Schwinge, sondern auch durch Componenten, welche in der Fläche der Schwinge gegen den vordern äussern Rand hinwirken, in Anspruch genommen werden. Man macht auch die Beobachtung, dass bei Vögeln, die mit dem Ende ihrer Flügel besonders energisch nach hinten schlagen, diese Krümmung des Kiels besonders deutlich ausgesprochen ist. (Säbelflügler, Numenius, viele Möven, Sterna, Schwalben).

wärts streben, mit regelmässigen Flügelschlägen dahinfliegen. Der Flügel bleibt dann so ziemlich bis zum Ende des Niederschlages in vollkommener Ausstreckung und zeigt die Jedem bekannte abwärts convexe Krümmung der Längslinie. Der Niederschlag geschieht schräg vorwärts abwärts so ziemlich bis zum Ende hin, es findet auch keine irgendwie erhebliche Planveränderung (Neigungsänderung der Sagittalprofile) statt. Es ist wahrscheinlich, dass dabei doch genügend grosse pronirte Flächen (an der Schranke) des Flügels vorhanden sind, um die geringe Vorbewegung zu unterhalten.

Bei diesem langsamen Fluge machte ich ausserdem die eigenthümliche Beobachtung, dass zu Anfang des relativen Niederschlages die basalen Abschnitte des Flügels eher etwas weniger supinirt sind als die übrigen schwach supinirten äusseren Theile des Flügels, ja vielleicht absolut pronirt; doch sind hier noch weitere Beobachtungen am Platze, namentlich auch solche, welche über das zeitliche Zusammenfallen der Phasen der relativen Flügelaktion mit den absoluten Oscillationen des Rumpfes Aufschluss geben.

Die verticalen Oscillationen des Rumpfes sind thatsächlich bei diesen Thieren ganz erheblich, wie PETTIGREW richtig angegeben hat.

Zusammenfassung.

a. Richtung des Schlages (Bewegung der Flügellängslinie). Es wird sich später noch deutlicher zeigen, dass nicht die Richtung des Schlages an sich, sondern die Richtung der Flügelflächen für die Richtung des locomotorisch nützlichen Widerstandes bestimmend ist.

Die Richtung des Schlages hat in anderer Beziehung ihre Bedeutung. Sie ist namentlich verschieden je nach der Massenvertheilung des Körpers und nach der jeweils nothwendigen Richtung und Richtungsänderung des Fluges.

Hebt sich der Vogel in steiler Linie, so schlagen die Flügel in Ebenen, welche einen nach vorn und oben offenen, ziemlich spitzen Winkel mit einander bilden, und der Rumpf selbst richtet sich steil auf.

Bei langsamem horizontalem Fluge bewegen sich die Flügel im allgemeinen fast in einer und derselben Querebene, welche nur wenig schräg nach vorn oben sieht. Doch ist die Richtung dieser Ebene je nach dem Bau des Flügels bei verschiedenen Thieren

verschieden. Fast immer ist der Schluss des Niederschlages mit einer wenn auch noch so geringen Rückführung verbunden.

Bei grösserer Horizontalgeschwindigkeit und wohl auch bei grösserer Anstrengung, vorwärts zu kommen, wird diese Rückführung des Flügels deutlicher und dementsprechend auch die Vorführung am Ende der Hebung und zu Anfang des Niederschlages. Beugung resp. Streckung der Hand spielt dabei mehr und mehr eine Hauptrolle, eine kleine Einziehung des Carpus gegen den Rumpf und die entsprechende Rückbewegung ist Begleiterscheinung. Betrachtung von der Seite oder von hinten lässt noch öfters die Natur der Bewegung übersehen. (Bei Wildenten z. B. habe ich lange Zeit die Phase der Rückführung der Flügel am Schluss des Niederschlages übersehen. Ich glaubte, dass der Flügel direkt vorwärts abwärts niederschlägt und in umgekehrter Richtung rückgeführt werde ohne eine erhebliche Planveränderung. In Wirklichkeit aber findet auch hier am Schluss eine Rückführung des Flügels statt, die Spitze beschreibt relativ zum Rumpf eine gerundete Figur). Die Beobachtung direkt von unten giebt besseren Aufschluss.

Mit steigender Horizontalbeschleunigung wirbelt die Flügelspitze immer deutlicher im Kreise herum, d. h. im gerundeten Umkreise einer immer breiter werdenden Figur. Zuletzt, bei reissendem Fluge, ist die Längsaxe dieser subovalen Figur nicht mehr senkrecht oder vorwärts abwärts, sondern mehr horizontal oder schräg rückwärts abwärts gerichtet.

Aus diesen Verschiedenheiten erklärt sich die so grosse Divergenz in der Ansicht der Autoren über diesen Punkt.

b. Die Grösse des verticalen und horizontalen Schlagwinkels muss demnach je nach den Umständen des Fluges ebenfalls sehr verschieden sein; ferner scheint der verticale Schlagwinkel sehr eingeschränkt werden zu können, wenn der Flügel verhältnissmässig lang und gross ist, und scheint immer beträchtlich sein zu müssen bei kleinem kurzem Flügel. Nach Marey ist er bei Enten sehr gross und beträgt mehr als 90°, während er beim Weih so klein ist, dass die Flügelspitze bei der höchsten und tiefsten Lage kaum über das Niveau der oberen und unteren Rumpfperipherie hinausrückt.

Auch beim Thurmfalken ist der verticale Schlagwinkel für gewöhnlich sehr klein im Vergleich zu andern gleich grossen und langflüglichen Thieren. Zu gleicher Zeit aber fällt die blitzartige Raschheit auf, mit welcher hier der einzelne Niederschlag erfolgt.

Die theoretischen Erörterungen über die Beanspruchung der Flugmuskulatur werden einiges Licht auf diese Verhältnisse werfen. Doch ist es sehr zu bedauern, dass kein besseres Beobachtungsmaterial vorliegt; von besonderer Wichtigkeit werden Untersuchungen sein, welche neben der Grösse des horizontalen und verticalen Schlagwinkels gleichzeitig die Zahl der Flügelschläge und zugleich die Grösse der Horizontalgeschwindigkeit gegenüber dem umgebenden Medium (nicht etwa bloss gegenüber der Erdoberfläche) feststellen. Einige wenige zuverlässige Beobachtungen dieser Art würden mehr werth sein, als noch so viele mangelhafte.

c. Was die Richtungsänderung der Sagittalprofile des Flügels betrifft, so muss nochmals betont werden, dass dieser stellenweise aus einzelnen abgeplatteten Stücken besteht, welche eine andere Richtung haben können, als die der Flügelplatte im Ganzen. Die Sagittalprofile der letzteren ändern bei gewissen Arten des Flügels während der ganzen Periode ihre Richtung sehr wenig. Die Basis des Flügels bleibt (beim normalen horizontalen Fluge) stets supinirt, ausgenommen vielleicht bei den Möven und ähnlich gebauten Thieren (s. folgend. Capitel). Aber beim langsamen oder verlangsamten horizontalen Fluge der Tauben bleibt auch die Flügelspitze als Ganzes anscheinend jederzeit supinirt. (Um so mehr ist dies der Fall, wenn mit solcher Vorbewegung ein sanftes Aufsteigen verbunden ist). Bei rascherem Vorwärtsfluge aber werden die äusseren Theile der Flügelplatte, wie sichere Beobachtungen bei verschiedenen Thieren (Taube, Krähe, Storch, Raubvögel, Möven) lehren, im Niederschlag, zum Mindesten in der zweiten Hälfte des Niederschlages, deutlich pronirt.

Die Neigungsänderung der Sagittalprofile ist um so grösser, je geringer die Vorwärtsbeschleunigung ist (Falke beim Rütteln). In einzelnen Fällen ist es gelungen, die pronatorische Drehung der einzelnen Schwung- und Fächerfedern gegenüber der Flügelplatte beim Niederschlag direkt zu beobachten (bei Ruderflügeln). Ueber ihre Stellung bei der Flügelhebung wissen wir durch direkte Beobachtung so gut wie nichts. Doch ist es möglich, aus dem Bau des Flügels und der Kenntniss der Trajektorien seiner Oberflächenpunkte hierüber einige Schlüsse zu ziehen (s. folg. Capitel).

d. Zahl der Flügelschläge. Zeitliches Verhältniss zwischen Niederschlag und Hebung. Aus dem Umstande, dass der Sperling nicht immer im Fliegen einen schwirrenden Ton erzeuge, sondern nur bei rascherem Flügelschlage,

schliesst PRECHTL, es mache dieser Vogel 6—10 Flügelschläge pro Secunde. Die Taube macht nach diesem Autor im Mittel 4, bei schnellem Fluge oder beim Steigen 5 Flügelschläge; die Saatkrähe im Mittel 3, im Maximum 4; der Adler gewöhnlich kaum 2, im Maximum 3. Diese Angaben verdienen nicht viel Vertrauen. Ich selbst bestimmte nach meinem Pulsschlag, dessen Frequenz gemessen war, die Zahl der Flügelschläge bei der Nebelkrähe bei mittlerer Horizontalgeschwindigkeit auf $4\frac{1}{2}$, diejenige des Storchs auf nicht ganz zwei pro Secunde. MAREY vermochte einige wichtige Daten über die zeitlichen Verhältnisse des Flügelschlages direkt zu registriren. Er fand beim Sperling 13, bei der wilden Ente 9, bei der Taube 8, bei einem Weih (busard) $5\frac{3}{4}$, bei einem Käutzchen 5 und bei einem Mäusebussarden (buse) 3 Flügelschläge pro Secunde. Doch flogen diese Thiere nicht ganz unbehindert.

Was das Verhältniss des Niederschlages zur Hebung betrifft, so hat schon PRECHTL angenommen, dass der Niederschlag mehr Zeit erfordere.

MAREY bestimmte die Dauer der Flügelhebung und des Niederschlages nach Hundertstel Secunden, bei der Ente auf 5 und $6\frac{2}{5}$, bei der Taube auf 4 und $8\frac{1}{2}$, bei dem Mäusebussard auf $12\frac{1}{2}$ und 20.

Im Uebrigen ist es Jedem bekannt, dafs im Allgemeinen die Flugthiere um so seltenere Flügelschläge ausführen, je gröfser sie selbst und je grösser verhältnissmässig ihre Flügel sind. Es hat aber natürlich keinen Sinn, aus einem so geringen und mangelhaften Beobachtungs-Material empirisch das mathematische Gesetz der Beziehung zwischen der Schnelligkeit des Flügelschlages und etwa dem Körpergewicht feststellen zu wollen. Theoretische Erwägungen geben hier zur Zeit noch viel sicherere und rationellere Anhaltspunkte. (S. im zweiten Haupttheil dieser Schrift).

E. Neue Registrirmethoden.

Zum Schluss sollen noch die Ergebnisse der photographischen Aufnahme von in Bewegung befindlichen Flugthieren besprochen werden, soweit mir das Material zugänglich ist. Seit die Empfindlichkeit der photographischen Platten so gesteigert worden ist, dass eine ausserordentlich kurze Zeit der Einwirkung des Lichtes eines Gegenstandes zur Erzeugung eines Bildes genügt (z. B. $\frac{1}{500}$—$\frac{1}{1000}$ Sec.), scheint die Photographie

berufen, in der Lehre von den Ortsbewegungen die allergrösste Rolle zu spielen. Ums Jahr 1882 brachte la Nature einen Bericht über Momentanaufnahmen der verschiedensten in Bewegung befindlichen Geschöpfe, welche von dem Amerikaner MUYBRIDGE hergestellt worden waren. Es gelang, die Eindrücke einer Anzahl solcher Aufnahmen, welche einer Reihe von aufeinanderfolgenden Stadien derselben Bewegung entsprachen, mit Hülfe des sog. Zootrops oder Phenakistoskops zum Eindruck einer continuirlichen, der wirklichen Bewegung annähernd entsprechenden Bewegung aneinanderzufügen. [1])

Auf den Wunsch von MAREY photographirte MUYBRIDGE auch Tauben im Flug. MAREY aber hat das Verdienst, ein schon bei astronomischer Beobachtung angewendetes Verfahren verwerthet zu haben, um in ganz regelmässigen Zeitintervallen photographische Aufnahmen des in Bewegung befindlichen Thieres, speciell eines Vogels zu erhalten. Er konstruirte im Winter 1881|82 seine photographische Flinte (Beschreibung in den Comptes rendus. 1882 T. 94. pg. 823 und 1013).

Mit der photographischen Flinte war man genöthigt, dem Objekt zu folgen, so dafs nur die relativen Bewegungen registrirt werden konnten. Ihre volle Bedeutung für die Lehre der Ortsbewegung konnte die photographische Methode nur gewinnen, wenn es gelang, auch die absoluten Bewegungen der Theilchen zu registriren. Es ist ein grosses Verdienst MAREY's, dieses Ziel klar erkannt und mit unermüdlichem Eifer verfolgt zu haben. Der wesentlichste Fortschritt nach dieser Richtung war die Anwendung einer einzigen, festgestellten photographischen Platte für eine Reihe von Momentaufnahmen, welche in regelmässigen Zeitintervallen auf einander folgten. Die zu überwindenden technischen Schwierigkeiten waren aber sehr gross. Es bedurfte einer ganz besonderen Empfindlichkeit der Platte; ein besonders günstiges Beleuchtungsverhältniss des Objektes wurde nothwendig gemacht u. s. w. (Comptes rendus. 1882 T. 95 pag. 15). Immerhin ist es MAREY gelungen, die absoluten Verschiebungen eines Objectes oder bestimmter mar-

[1]) Zur Verdeutlichung thierischer Bewegung ist die rotirende Scheibe (Wunderscheibe, Phenakistoskop) mit am frühesten von AL. ECKER verwendet worden, bei Gelegenheit der Erläuterung der Bewegung der Flimmerhaare. (S. ICONES physiologicae. Leipzig 1851 bis 1859. Tafel XI und erläuternder Text dazu). Mir hat eine stroboskopische Scheibe bei der Beobachtung fliegender Mauerschwalben (1878) einige Dienste geleistet. Diese Methode der Beobachtung, gehörig vervollkommnet, verspricht guten Erfolg.

kirter Oberflächenpunkte desselben parallel einer bestimmten Ebene photographisch zu registriren, auch in Fällen, wo die blosse Beobachtung völlig im Stich lässt. Für die Analyse der Gang- und Sprungbewegung des Menschen hat diese Methode bereits Wichtiges geleistet.

Die bis Mitte 1884 von MAREY publicirten Serienphotographien von fliegenden Vögeln geben mit Bezug auf die Verhältnisse des normalen Horizontalfluges noch keinen Aufschluss. Doch hat jener verdiente Forscher in Aussicht gestellt, dass er diese neuen, vielversprechenden Methoden zu ausgedehnten Untersuchungen über die Flugbewegung verwerthen werde.

Ich will hier mit Contourlinien das Bild reproduciren, welches MAREY von einer fliegenden Taube erhalten und im 96. Bande der Comptes rendus (pg. 1399 u. ff.) „abgedruckt" hat. Das Zeitintervall zwischen zwei benachbarten Aufnahmen betrug $\frac{1}{5}$ Secunde, etwas weniger als der Dauer eines Flügelschlages entsprach, so dass jedes nach links folgende Bild einer etwas früheren Phase der Periode entspricht. Ich habe mir erlaubt, durch eine punktirte Linie ganz annähernd den Weg anzudeuten, welchen etwa das äussere Ende des Flügels beschrieben hat. Es handelt sich hier sicher nicht um die Verhältnisse des normalen, horizontalen Fluges, sondern um ein ziemlich steiles Aufsteigen.

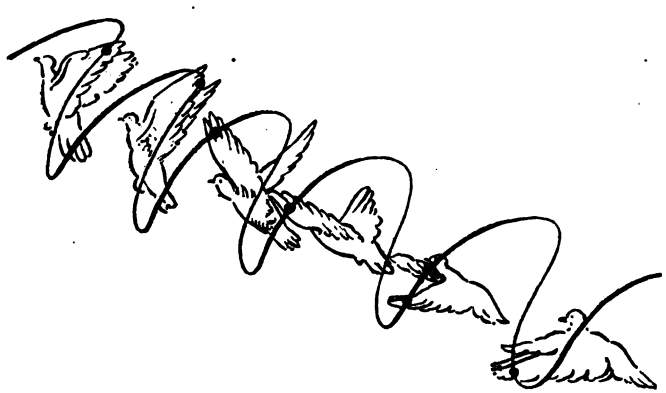


Fig. 12.

Diesem Umstand vor Allem schreibe ich es zu, dass der Flügel beim Niederschlage so weit vorgeführt wird, ferner auch, dass die relative Hebung so gross ist.

Meine eigenen Beobachtungen haben mir ergeben, dass eine Taube, wenn sie durch Flügelschläge einigermassen steil emporsteigt, ihre Flügel wesentlich in Ebenen bewegt, welche einen nach vorn oben offenen Winkel mit einander bilden. Die mediane Schnittlinie der beiden Ebenen liegt auch noch mit Bezug auf die jeweilige Richtung des Rumpfes ventral weiter gegen den Kopf des Thieres zu; besonders ausgeprägt ist aber dieser Umstand, so lange die supinatorische Drehung des Ganzen noch zunimmt.

Ich will bei dieser Gelegenheit bemerken, dass beim Aufsteigen mit Flügelschlägen der Flügel bei der Hebung nothwendig einen sehr grossen dorsalen Widerstand erzeugen muss, welcher den Vogel vorwärts treibt. Beim Niederschlag ist dagegen der Flügel im Ganzen fast stets supinirt. Nur die grossen Schwungfedern mögen horizontal oder etwas pronirt sein [1]).

Es ist hier der Ort, auch noch an die ausgezeichneten Leistungen des Herrn Oswald Anschütz (Lissa-Posen) im Gebiete der Momentanphotographie zu erinnern. Dass wir in ihm einen Mann von scharfer Beobachtungsgabe für die Phaenomene der Bewegung und von vorzüglichem technischen Können besitzen, braucht wohl nicht weiter hervorgehoben zu werden. Seine Bilder aus dem Leben einer Storchenfamilie sind neben vielen andern bereits weltbekannt. Hier wäre eine nachdrückliche Unterstützung durch Privatmittel und durch wissenschaftliche Körperschaften gewiss sehr gut angebracht. Nur eine solche könnte es dem bescheidenen Manne möglich machen, seine Kraft in erfolgreicher Weise in den Dienst der Wissenschaft zu stellen.

Wenn einerseits die relativen Bewegungen, andererseits die Trajectorien der wichtigsten Orientirungspunkte des Vogelkörpers für irgend ein bestimmtes Flugthier und eine bestimmte Flugart durch diese neuen Methoden ermittelt sind, so wird es sich sehr

[1]) Will das Thier seine Vorbewegung schnell annulliren, ohne sich zu heben oder rasch zu drehen, so schlägt es mit den Flügeln noch mehr direkt vorwärts, fast in einer Horizontalebene durch das Schultergelenk. Dabei aber erfolgt, sicher durch besondere Anstrengung bestimmter Muskeln, eine hochgradige Supination des Flügels, so dass sein Vorderrand jetzt annähernd über dem Hinterrand stehen kann. Ausserdem krümmt sich der Flügel am Ende des Vorschlages über die nun vorwärts einwärts gewendete Unterfläche, sodass beide Flügel zusammen, von unten gesehen, wo sie fast zu Linien verkürzt erscheinen, eine leier- oder U-förmige Figur bilden; die Flügelspitzen überragen dann den Kopf. Wie der Rückschlag erfolgt, vermag ich nicht anzugeben.

empfehlen, ein Modell herzustellen. Genau entsprechend jeder einzelnen bekannten Momentanstellung könnte ein Exemplar der betreffenden Species ausgestopft und aufgestellt werden; diese einzelnen Modelle müssten in den richtigen Abständen angeordnet, die Trajektorien der einzelnen wichtigsten Oberflächenpunkte aber durch Drähte dargestellt sein. Auf diese Weise könnte das Verständniss der Bewegung sehr gefördert werden.

Wir müssen immer eine solche Operation im Geiste vornehmen, wo es gilt, über Ort und Grösse der erzeugten Widerstände ein Urtheil zu fällen.

F. Die Trajektorien der Oberflächenpunkte des Vogelkörpers beim horizontalen Normalflug. Folgerungen bezügl. der Widerstände.

Es ist kaum möglich, die Bahnen, welche von einzelnen, auch den markirtesten Punkten des Flügels im Raum beschrieben werden, direkt durch Beobachtung zu ermitteln; immer beurtheilen wir die Bewegungen des Flügels naturgemäss nach ihrem Verhältniss zum Rumpf; es fehlt eben in der Regel in der unmittelbaren Nähe des fliegenden Vogels an fixen materiellen Punkten der Umgebung, auf welche wir die Bewegung des Thieres beziehen könnten, oder wo sie vorhanden sind, stören sie zugleich den regelmässigen Gang der Flugthätigkeit oder beeinflussen unser Gesichtsfeld. Etwas entfernter liegende Hintergründe aber können schwer zu gleicher Zeit mit dem Vogel fixirt werden. Ich habe oft versucht zu ermitteln, ob die Flügelspitze am Ende des Niederschlages absolut rückwärts geht, wovon sicher nur die Rede sein könnte bei sehr energischer Vorwärtsbeschleunigung des Thieres, — konnte aber niemals mit Sicherheit bestimmen, dass es wirklich, oder dass es nicht der Fall war. Vielleicht sind Andere hierin glücklicher als ich.

Die Ergebnisse der MAREY'schen Registrirversuche können aus den schon angedeuteten Gründen nicht zur Beurtheilung der Verhältnisse des freien Fluges verwerthet werden. Wohl aber unterliegt es gar keinem Zweifel, dass mit Hülfe ganzer Serien von Momentanphotographien, welche das Bild des fliegenden Vogels in regelmässigen Intervallen und in räumlichen Abständen, welche der absoluten Bewegung des Thieres proportinal sind, auf dieselbe

empfindliche Platte projicirt zeigen, die Frage nach den Trajektorien der einzelnen Körpertheile gelöst werden kann. Die bis jetzt bekannt gewordenen Serien dieser Art lassen sich leider für unsere Zwecke noch nicht verwerthen.

Wir sind deshalb darauf angewiesen, uns in weit mangelhafterer Weise zu behelfen, nämlich durch Combination der Erfahrungen über die relativen Bewegungen des Flügels zum Rumpfe mit dem, was wir bezüglich der gleichzeitigen absoluten Bewegung des Rumpfes wissen.

Was nun die absolute Bewegung des Rumpfes betrifft, so führt uns Ueberlegung zu dem Schluss, dass sie durch verticale Oscillationen und durch periodische Schwankungen der horizontalen Geschwindigkeit complicirt sein muss. Aber nur bei grösseren Vögeln mit langen grossen Flügeln vermag direkte Beobachtung die Verhältnisse dieser Oscillationen, speciell der verticalen, festzustellen. In anderen Fällen erscheint zwar die Bewegung des Rumpfes etwas ungleichmässig, aber jede genauere Beurtheilung und Schätzung der Schwankungen ist unmöglich. Sicher beruht dies zum Theil auch wieder auf dem Fehlen von ruhenden Orientirungspunkten der Umgebung. Immerhin aber können wir in einer ganzen Anzahl von Fällen die Bewegung des Rumpfes ohne grossen Fehler als eine gleichmässige bezeichnen.

Für die Taube, die Krähe und den Storch will ich im Folgenden diese Voraussetzung machen. Ist die relative Bewegung des Flügels zum Rumpf bei diesen Thieren bekannt und ebenso die horizontale Geschwindigkeit v, so lassen sich nun die wirklichen Trajektorien der Punkte ermitteln, und daraus und aus der Stellung der Oberflächen kann auf die Luftwiderstände geschlossen werden.

Bei anderen Fliegern, bei welchen die Oscillationen des Rumpfes erheblich ins Gewicht fallen, werden sich zwar für den Rumpf und für die basalen Theile des Flügels wesentlich andere Verhältnisse der Trajectorien und Luftwiderstände ergeben. An weiter aussen im Flügel gelegenen Punkten aber fällt die Verschiedenheit immer weniger ins Gewicht. So dürfen wir immerhin hoffen, bei den erst genannten Thieren wesentliche Aufschlüsse über die Funktion des Flügels und seiner verschiedenen Einrichtungen beim Flügelschlage zu gewinnen, welche als Fingerzeige bei der Untersuchung der complicirteren Form des Fluges benutzt werden können.

1. Oscillationen des Rumpfes unerheblich.

a. Anhaltspuncte zur Beurtheilung des Trajektoriums der Flügelspitze.

	Taube	Krähe	Storch
1. Zahl der Flügelschläge pro Sec.	8	4,5	1,8
2. Flügellänge	30 cm	40 cm	80 cm
3. Vertic. Schlagwinkel	60^0	50^0	45^0
4. $\tau : t$	1 : 2	3 : 5	1 : 2
Dauer der Hebung τ	$\frac{1}{24}$ Sec.	$\frac{1}{12}$ Sec.	$\frac{5}{27}$ Sec.
Dauer des Niederschlages t	$\frac{1}{12}$ „	$\frac{5}{36}$ „	$\frac{10}{27}$ „
5. Horizontalgeschwindigkeit v	900—1200 cm	700—800 cm	900 cm
Verticale Excursion der Flügelspitze	30 cm	37,5 cm	55 cm
Horizontaler Weg der Fl.spitze bei d. Hebung	$37\frac{1}{2}$—50 cm	$58\frac{1}{3}$—$66\frac{2}{3}$	$166\frac{2}{3}$ cm
Steigungswinkel α	$38\frac{2}{3}$—31^0	$32\frac{2}{3}$—$29\frac{1}{3}{}^0$	$18\frac{1}{3}{}^0$
Horizontaler Weg der Flügelspitze beim Niederschlag	75—100 cm	97—111 cm	$333\frac{1}{3}$ cm
Absteigwinkel β	$21\frac{2}{3}{}^0$—$16\frac{2}{3}{}^0$	21—$18\frac{2}{3}{}^0$	$9\frac{1}{3}{}^0$

Für die folgende Berechnung darf man ohne erheblichen Fehler annehmen, dass die Flügelspitze am Beginn und am Ende des Niederschlages in derselben queren Verticalebene des Rumpfes liegt, sich demnach sowohl bei der Hebung als während des Niederschlages in der x-Richtung mit einer mittleren Geschwindigkeit bewegt, welche derjenigen des Ganzen gleich ist.

Könnte man voraussetzen, dass die verticale Geschwindigkeit für die ganze Zeit des Niederschlages und dann wieder für die Hebung constant ist (in beiden Zeiten natürlich verschieden, weil ja dieselbe verticale Strecke bei der Hebung schneller zurückgelegt wird, als beim Niederschlag), so würde die Bewegung der Flügelspitze, soweit sie bei der Betrachtung von der Seite (in der xv-Ebenenprojection) zur Geltung kommt, in einer Zickzacklinie geschehen (Fig. 13 $mnop$).: bei der Hebung aufwärts vorwärts in einer geraden Linie, die mit der x-Richtung den Winkel

α bildet, den wir als Steigungswinkel bezeichnen; beim Niederschlage vorwärts abwärts aber in einer geraden Linie, die mit der z-Richtung den Absteigwinkel β bildet.

Diese beiden Winkel sind für die Taube, Krähe und den Storch in unserer Tabelle aus den mit 1—5 bezeichneten Voraussetzungen berechnet worden.

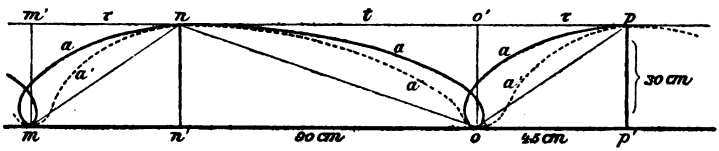


Fig. 13.

Nun ist aber die verticale Geschwindigkeit keine gleichmässige; vielmehr zeigt die Aufwärtsbewegung der Flügelspitze ein sehr plötzliches Maximum bald nach Beginn der Hebung, die Abwärtsbewegung aber ein relativ weniger hohes Maximum in der zweiten Hälfte des Niederschlages. Entsprechend diesen Maxima muss die Flügelspitze natürlich viel steiler auf- resp. absteigen, als den Theil-Stücken jener Zickzacklinie entspricht, während dafür natürlich am Beginn und am Ende des Niederschlages und der Hebung die Steilheit geringer ist. Es müsste das Sagittalprofil der Flügelspitze annähernd dieselbe Steigung aufweisen, wie das auf die Sagittalebene projicirte Trajektorium derselben, wenn sie genau mit der Vorderkante voran gegen die Luft ginge; ja so lange es sich um die Hebung des noch gesenkten Flügels handelt, müsste die supinatorische Neigung des Sagittalprofils sogar eine steilere sein. Die pronatorische Neigung des Sagittalprofils dagegen beim Niederschlag darf, nachdem die Horizontalebene des Schultergelenkes passirt ist, nicht so gross sein, wie die Neigung der Sagittalprojection des Trajectoriums, wenn auch hier das Flügelende genau mit der Vorderkante voran die Luft durchschneiden soll.

Wir können nun aber auf Grund unserer Beobachtungen mit Sicherheit behaupten, dass beim horizontalen Normalflug der Supinationswinkel des genannten Sagittalprofils während der Hebung bei der Taube niemals den Werth 35°, bei der Krähe niemals die Grösse 30°, beim Storch nicht den Betrag 20° erreicht.

Im Moment der maximalen Hebungsgeschwindigkeit ist demnach bei allen 3 Thieren die Supination

des Flügelendes viel zu gering, als dass das letztere die Luft genau in der Richtung seiner Fläche, mit der Kante voran durchschneiden könnte.

Es besteht kein Zweifel, dass zu dieser Zeit die Dorsalseite der Flügelspitze gegen die Luft geführt wird.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass ich die Horizontalgeschwindigkeit v im Vergleich zum Schlagwinkel und zur Anzahl der Flügelschläge eher zu gross als zu klein gesetzt habe.

Für die Flügelspitze der Taube erhält man also (für $v =$ 1180 cm) ein Trajectorium, dessen sv-Projection etwa die Form der in Fig. 13 dargestellten Curven hat. Die ausgezogene Curve *aaa* würde der Annahme entsprechen, dass die Flügelspitze am Ende des Niederschlages absolut etwas rückwärts geht, die punktirte Curve $a^1a^1a^1$ der wahrscheinlicheren Annahme, dass dies nicht der Fall ist.

b. Trajectorien der übrigen Punkte.

Was für das Flügelende gefunden wurde, gilt natürlich nicht ohne Weiteres für die mehr basal gelegenen Theile der Flügelfläche. Je näher dieselben dem Schultergelenk liegen, desto geringer ist ihre verticale Excursion bei derselben mittleren horizontalen Geschwindigkeit, desto geringer sind auch die Abänderungen der verticalen und horizontalen Geschwindigkeit, desto gestreckter also die Trajectorien. Nun ist zwar die supinatorische Neigung der basalen Theile des Flügels gegenüber derjenigen des Flügelendes bei der Hebung etwas geringer. Trotzdem aber entspricht sie besser dem Maximum der Steilheit, mit welcher diese Theile vorwärts aufwärts sich bewegen. Die Zeit, während welcher die obere Seite voran gegen die Luft geht, wird demnach um so kürzer, je mehr basal gelegene Theile des Flügels man ins Auge fasst. Ja es muss zuletzt eine Stelle kommen, wo eine solche Zeit gar nicht mehr vorhanden ist. Zunächst beim Schultergelenk geht der Flügel sicher auch bei der Hebung stets mit der etwas supinirten Seite voran gegen die Luft.

Da wo der Flügel eine compakte Platte darstellt, wird natürlich der Luftwiderstand an derjenigen Seite erzeugt, welche gegen die Luft vorrückt. Wie verhält es sich aber an dem äussersten Theil des Flügels, der durch eine einfache Reihe von Contourfedern gebildet wird?

In der Fläche der Schwinge stehen die Ebenen der einzelnen

Schwungfedern schräg, der vordere (äussere) Rand bei natürlicher Gleichgewichtslage etwas nach dem Dorsum zu gerichtet. Beim Niederschlage, überhaupt sobald der Flügel mit der Unterseite und Vorderkante voran gegen die Luft geht, werden diese einzelnen Federfahnen deshalb um so voller von der Luft gepackt und vermöge ihrer Asymmetrie in pronatorischem Sinne gedreht; da wo die Federn isolirt vorstehen, unter Umständen so weit, dass nun der Hinterrand gegen das Dorsum des Flügels zu abweicht, doch natürlich niemals ganz soweit, dass ihre Unterflächen dem Einfluss des Luftwiderstandes gänzlich entrückt werden. Auch wenn die Hebung des Flügels beginnt und die Spitze noch rückgeführt wird, dauert diese Einwirkung noch einen Moment an. In den nun folgenden Phasen aber geht nicht mehr die Unterfläche des ganzen Flügelendes, sondern die vordere Kante, ja die obere Seite voran gegen die Luft. Die Schwingen drehen sich dann sehr schnell in ihre natürliche Gleichgewichtslage zurück. Aber auch diese ist keine so stark supinatorische, dass im Moment der schnellsten Hebung die einzelnen Schwungfedern bloss mit dem Vorderrand die Luft treffen könnten, vielmehr erzeugt ihre Oberseite einen Luftwiderstand; und wenn auch noch so leicht unter dem Einfluss desselben die Supinationsstellung der Schwungfedern vermehrt wird, was eine Verminderung des Einflusses des dorsalen Luftwiderstandes zur Folge hat, so kann diese Supination doch nicht so weit gehen, dass der dorsale Luftwiderstand = 0 wird.

Die Luft gleitet zwar leicht an der glatten Rückseite dieser Federn vorbei und durch die schmalen oder breiten Zwischenräume zwischen ihnen hindurch, aber doch nicht ohne einen Druck senkrecht zur Fläche auszuüben.

Wie an der einzelnen Schwungfeder die Stellung des hintern zum vordern Rande von der Einwirkung des Luftwiderstandes mit abhängt, so natürlich auch an der ganzen Schwinge; und wenn auch noch am Fächer ein dorsaler Luftwiderstand entwickelt wird, so muss natürlich auch hier in Folge davon der Hinterrand des Fächers gegenüber dem gesteiften Vorderarm (und der Ebene des Flügeldreiecks) gesenkt werden. Eine derartige Einwirkung muss aber, zum Unterschied von der Einwirkung auf die einzelnen Schwungfedern, die Stellung der Flügelfläche als Ganzes beeinflussen und braucht daher nicht noch einmal von uns in Rechnung gebracht zu werden.

Ein jeder Luftüberdruck dorsal an supinirten

Flächen des Flügels zerlegt sich in eine abwärts treibende schädliche und in eine vorwärts treibende locomotorisch nutzbare Componente (von der queren können wir absehen).

Es wird zwar vor allem die Aufwärtsbewegung des Flügels selbst erschwert, aber diese Wirkung kommt einer Einwirkung auf den Gesammtschwerpunkt gleich. Es gleiten zwar vor allem die Flügel an der widerstehenden schiefen Fläche der Luft nach vorn ab; aber auch dies repräsentirt natürlich eine Einwirkung auf die Gesammtmasse, ob nun der Flügel als starres Ganzes nach vorn gedreht wird oder vor allem seine weniger gegenüber dem Rumpf fixirten Theile. Die eingezogene Schwinge wird durch diesen Widerstand an der Dorsalseite wirklich ausgestreckt u. s. w. So wirkt ein grosser Theil des Widerstandes an der Dorsalseite des aufwärts bewegten Flügels nützlich, indem er zugleich die Vorbewegung der Gesammtmasse vermehrt und die Configuration des Systems in nützlicher Weise ändert, also innere Kräfte (Muskelaktion) erspart. Er unterstützt die Vorführung und Ausbreitung des Flügels bei der Hebung.

Die nützliche vorwärts treibende Wirkung überwiegt um so mehr über die schädliche abwärts gerichtete, je stärker die Flächen, an denen er sich entwickelt, supinirt sind. Die configurationsändernde Wirkung aber wird besonders dadurch begünstigt, dass die Einwirkung weit entfernt von den Drehpunkten des Schulter- und des Handgelenkes stattfindet; sie kann immer noch beträchtlich sein, selbst wenn nur an dem äussersten Ende des Flügels ein dorsaler Widerstand zur Geltung kommt.

Mit der Hebung des Flügels verbindet sich also naturgemäss eine Streckung, nicht, wie Viele angenommen haben, eine Einziehung des Flügels. Letztere unterstützt, wie schon erörtert wurde, zum Schluss die Wirkung des Niederschlages zur Hebung und Vorbewegung des Ganzen; freilich wird sie von Bedeutung auch für die Hebung des Flügels. Es erlaubt ja die Beugung im Handgelenk eine grössere Supinationsstellung der ganzen Schwinge und der einzelnen Schwungfedern, vermindert also die Grösse des dorsalen Widerstandes an den mit der grössten Aufwärtsgeschwindigkeit behafteten Flügeltheilen und verändert zugleich das Verhältniss der beiden Componenten desselben zu Gunsten der vorwärts treibenden.

Die schädliche Wirkung des dorsalen Widerstandes ist durch derartige kunstvolle Einrichtungen, welche vor allem die Zunahme der passiven Supinirbarkeit der ein-

zelnen Flügelflächenstücke gegen die Flügelspitze hin ermöglichen, zwar möglichst beschränkt; es kommt ein Theil der durch ihn vermehrten Hebungsanstrengung der Vorbewegung zu gute und hilft die Configuration nützlich verändern; ganz eliminirt kann aber der daraus entspringende Nachtheil nicht werden. Ist es etwa denkbar, dass durch geeignete Einrichtungen des Flügels und besondre Thätigkeit seiner Muskeln die Flügelflächen so aktiv umgestellt werden könnten, dass sie bei der Hebung mit noch geringerem Widerstande die Luft durchschneiden? Die Anpassungsmöglichkeit an die jeden Augenblick obwaltenden Verhältnisse wäre nur zu erzielen dadurch, dass den schädlichen Widerständen eine, wenn auch noch so geringe Einwirkung verbliebe, welche die regulatorische Umstellung des Flügels veranlasst; die Umstellung selbst würde mit grossem Aufwand an Muskel- und Nervenkraft verbunden sein. Der Nachtheil eines grösseren dorsalen Widerstandes muss dem gegenüber als der geringere, die vorhandene Regulation ohne Mitwirkung der Muskeln möchte im Allgemeinen als genügend genau erscheinen.

Die Grösse des dorsalen Widerstandes ist übrigens je nach dem Flugthier und der Art seines Fluges verschieden.

Ich werde später erörtern, dass die locomotorische Leistung beim normalen Fluge dem Gewicht P des Thieres proportional bleibt, wenn die mittlere Horizontalgeschwindigkeit sich verhält wie $P^{1|6}$, oder wenn $\frac{v}{P^{1|6}}$ constant ist. Bei gleich grosser relativer Grösse der Flügelfläche $\left(\frac{P^{1|2}}{P^{1|3}}\right)$ und relativer Länge des Flügels $\left(\frac{L^{1|2}}{P^{1|3}}\right)$ bleibt dann auch das Verhältniss der verticalen Excursion der Flügelspitze zur horizontalen beim Niederschlage oder bei der Hebung annähernd dasselbe, ganz abgesehen von der Zahl der Flügelschläge. Ein relativ grösserer Flügel bedingt eine verhältnissmässig kleinere verticale Excursion. Eine relativ grössere horizontale Geschwindigkeit ist jenseits einer gewissen Grenze nur durch eine Vergrösserung der (relativen horizontalen und der) verticalen Excursionen des Flügels im Verhältniss zu der mittleren Horizontalgeschwindigkeit zu bewerkstelligen [1]).

[1]) Andererseits müssen die verticalen Excursionen im Verhält-

Ich werde ferner zeigen, dass kleinere Flugthiere im Allgemeinen in den Stand gesetzt und durch die gegenseitige Concurrenz darauf angewiesen sind, sich mit verhältnissmässig grösserer Horizontalgeschwindigkeit zu bewegen. Dementsprechend wird bei ihnen im Allgemeinen der schädliche dorsale Widerstand bei der Flügelhebung ein grösserer sein müssen. Dies ist um so mehr der Fall, je kleiner im Verhältniss zu dem übrigen Körper die Proportionen ihres Flügels sind. Ich bin der Meinung, dass die kleineren Flugthiere geradezu die Flügelhebung mit benutzen, um ihre Vorwärtsgeschwindigkeit noch stärker zu vermehren, als sie es sonst thun könnten, — obschon in Folge davon die für das Verbleiben in demselben Niveau erforderliche Arbeit eine grössere wird. Von diesem Gesichtspunkte aus verstehen wir die Unterschiede in dem Verhältniss zwischen horizontaler und verticaler Verschiebung der Flügelspitze bei der Taube, der Krähe und dem Storch (S. unsre Tabelle pg. 86).

Wir kommen aber auch zu dem Schlusse, dass zwischen dem Fluge der kleinen Insekten und demjenigen der Vögel hinsichtlich der Wirkung der Flugflächen auf die Luft beim regelmässigen Flügelschlag nicht der grosse prinzipielle Unterschied besteht, den viele Autoren annehmen. Man ist allgemein der Ansicht (Strauss-Dürckheim, Marey), dass der Insektenflügel bei der Hebung mit der Oberseite voran gegen die Luft geht, obschon diese Thatsache eigentlich nur für den stationären, nicht aber für den fortschreitenden Flug dieser Thiere sicher durch Beobachtung festgestellt ist. Für die Vögel aber würde man mit der gleichen Sicherheit eben dasselbe für den stationären Flug behaupten können Wenn daher angenommen wird (Marey, Tatin), dass der Flügel der Vögel in wesentlich andrer Weise bewegt werde, indem die äusseren Theile mit der scharfen Kante, die innern sogar mit der Unterseite voran gegen die Luft gehen, so gilt das sicher nicht ganz allgemein. Man kann zugeben, dass diese Annahme auf den fortschreitenden Flug grösserer Vögel so ziemlich passt; ich meine aber, dass sie um so ungenauer ist, je kleiner der Vogel, je grösser seine relative Horizontalgeschwindigkeit und je kürzer (relativ) der Flügel ist. Man wird finden, dass mit Be-

---

niss zu der horizontalen Bewegung auch wieder ausgiebiger werden, wenn die Grösse der horizontalen Bewegung sich der Gränze *0* nähert. (Stationärer Flug. Falken beim Rütteln.)

zug auf die in Rede stehenden Verhältnisse durch die Schwalben und Kolibris hindurch z. B. zu den Libellen ein allmähliger Uebergang vorhanden ist. Andererseits ist, wie gesagt, jene Annahme auch dann nicht richtig, wenn die horizontale Geschwindigkeit sehr gering ist.

Hinsichtlich der Trajektorien der verschiedenen Punkte des Flügels beim Niederschlage kann ich mich kurz fassen. Für die Basis des Flügels sind die Trajektorien geradlinig, sobald die Oscillationen des Rumpfes resp. der Schulter vernachlässigt werden können; je weiter die Oberflächentheile des Flügels distal liegen, desto steiler steigt ihre Bahn bei der Hebung des Flügels in die Höhe und bei dem Niederschlage abwärts. Je grösser im Verhältniss zur verticalen relativen Excursion die horizontale Vor- und Rückführung ist, desto weniger gleichen die Trajectorien einer Sinuscurve, desto mehr aber einer Cycloide. Solches gilt z. B. für die Flügelspitze im Vergleich zum Trajektorium des Carpus, weil ja die Schwinge nicht bloss mit dem Flügel als ein Ganzes, sondern auch noch für sich gegenüber dem Carpus bewegt wird. Je weiter die Punkte nach aussen liegen, desto schärfer werden die Umbiegungen ihrer Trajektorien an den unteren Wendepunkten. Doch schreitet sicher in der Regel die Flügelspitze auch beim tiefsten Stande, trotz der relativen Rückbewegung, noch vorwärts. Ob unter Umständen die absolute Vorbewegung in diesem Augenblicke = 0 oder sogar negativ sein, das Trajektorium also hier die Spitze eines scharfen Winkels oder sogar eine Schleife aufweisen kann, vermag ich, wie gesagt, nicht zu entscheiden. — Am Flügel allein und falls keine Schleifenbildung vorkommt, allein beim Niederschlage ist Gelegenheit gegegeben, dass pronirte Oberflächen des Vogelkörpers gegen die Luft sich verschieben. Hier allein (abgesehen von dem Widerstande an der Dorsalseite der supinirten Flügelflächen bei der Hebung) können Luftwiderstände eine vorwärts treibende Wirkung haben. Es ist aber leicht einzusehen, dass die Sagittalprofile der Flächen, wenn sie überhaupt gegen die Luft bewegt werden sollen, dabei weniger pronirt sein dürfen, als der Neigung ihrer Trajektorien entspricht. Dies gilt ganz genau nur für den Fall, dass die gleichzeitige quere Bewegung der Punkte = 0 ist, in ganz besonderem Maasse für den Fall, dass der Flügel sich der Mittelebene nähert; es braucht in geringerem Grade der Fall zu sein,

je mehr der Flügel zugleich nach aussen schlägt. Die zulässige Pronation ist für verschiedene Theile des Flügels im Allgemeinen um so kleiner, je näher dieselben dem Schultergelenk liegen, und für entsprechende Theile des Flügels um so geringer, je kleiner die verticale Excursion der Flügelspitze im Verhältniss zu der mittleren Horizontalgeschwindigkeit derselben ist, beim Storch also z. B. kleiner als bei der Taube.

Es ist bekannt, dass thatsächlich beim Niederschlag die Pronation der Flügelfläche im Ganzen, namentlich aber die pronatorische Neigung an den Flächen der einzelnen Gliederstücke des Flügels gegen dessen Spitze hin zunimmt, wobei der Luftwiderstand selbst die Hauptrolle spielt. Die Sagittalprofile der Flügelbasis bleiben auch beim Niederschlag in der Regel noch etwas supinirt.

c. Resultirende Einwirkung der Luftwiderstände.

Man kann zugeben, dass die Aenderungen der horizontalen Geschwindigkeit des Rumpfes noch erheblich sein können, während die verticalen Oscillationen für die Beobachtung nicht mehr wahrnehmbar sind. Das Maximum der horizontalen Vorwärtsgeschwindigkeit des Rumpfes dürfte etwa an der Gränze von t zu τ vorhanden sein. Da der Rumpf und die Flügelbasis etwas aufgerichtet sind und ihre Unterflächen wie eine Drachenfläche gegen die Luft gehen, so muss ein periodisch wechselnder Luftwiderstand erzeugt werden, der eine verticale, stets nach oben gerichtete Componente hat. Immerhin kann bei der Taube, bei der Krähe, beim Storch die Grösse der Zu- und Abnahme dieses Widerstandes im Verhältniss zu seinem mittleren Betrag keine sehr grosse sein. — Der an den Flügeln erzeugte verticale Widerstand hat offenbar ein Maximum um die Mitte des Niederschlages, das mehrmals grösser ist als das Maximum des Rumpfwiderstandes, und ein Minimum vor der Mitte der Hebung, das wohl von 0 unter Umständen, z. B. bei der Taube nicht weit entfernt ist. Auf jeden Fall ergiebt sich für den gesammten verticalen Luftwiderstand für jede Periode ein Hauptmaximum und ein Hauptminimum, abgesehen von kleineren Schwankungen; jenes fällt in die Zeit des Niederschlages, dieses in die Hebung.

Der resultirende horizontale Widerstand hat eine maximale nach vorn gerichtete Wirkung (gegen Ende des Niederschlages) und eine maximale Wirkung nach der umgekehrten Richtung (am Ende der Hebung).

2. Berücksichtigung der Oscillationen des Rumpfes.

Sie hängen von folgenden zwei Verhältnissen ab:

a) Von den relativen Bewegungen zwischen Rumpf und Flügel oder von den Bewegungen des Rumpfes gegenüber dem gemeinsamen Schwerpunkt.

b) Von der resultirenden Wirkung der äusseren Kräfte auf das Ganze, oder von den Oscillationen des gemeinsamen Schwerpunktes.

a. Relative Bewegung gegenüber dem Gesammtschwerpunkt.

Nach PRECHTL pg. 222 ist

bei	Gesammtgewicht P in Loth	Das Gewicht F beider Flügel in Loth	Das Verhältniss von $F:P$
Saatgans	208	28	1 : 7,43
Thurmfalk . . .	14	2	1 : 7
Kibitz	13	2	1 : 6,5
Taubenhabicht . .	38 $^1/_2$	6 $^1/_2$	1 : 5,9
Saatkrähe . . .	30	5 $^1/_3$	1 : 5,66
Steinadler . . .	192	38	1 : 5,05
Seeadler	288	60	1 : 4,8

Beide Flügel zusammen machen also im Mittel ungefähr $^1/_6$ des Gesammtgewichtes aus, der Rumpf $^5|_6$. Es giebt aber Thiere, z. B. die Möven, bei welchen die Flügel einen noch erheblich grösseren Bruchtheil des Körpergewichtes ausmachen als beim Seeadler.

Nehmen wir nun mit PRECHTL (l. c. pg. 220) an, dass der Schwerpunkt des Flügels meist ungefähr an der Grenze des basalen und mittleren Drittels der Flügellänge gelegen ist, und nennen die relative Bewegung jeder Flügelspitze zum Rumpf in verticaler Richtung $= a$, so ist die relative verticale Bewegung jedes Flügelschwerpunktes oder des gemeinsamen Schwerpunktes beider Flügel zum Rumpfe $= \frac{a}{3}$. Diese Bewegung setzt sich zusammen aus der relativen verticalen Bewegung ϱ des Rumpfschwerpunktes S gegenüber dem gemeinsamen Schwerpunkt Σ und aus der verticalen Bewegung φ der Flügelschwerpunkte gegenüber letzterem. $\varrho + \varphi = \frac{a}{3}$. Für gewöhnlich ist

$$\varrho : \varphi = F : R = 1 : 5 \text{ bis } 6.$$

$$\varrho : (\varrho + \varphi) = R : F = 1 : 5 \text{ bis } 7 = \varrho : \frac{a}{3}$$

demnach ist $\varrho = \frac{a}{15 \text{ bis } 21}$. Je schwerer der Flügel gegenüber dem Rumpf ist, desto grösser ist die relative Bewegung des Rumpfes zum gemeinsamen Schwerpunkt im Vergleich zur gesammten verticalen Excursion des Flügelschwerpunktes gegenüber dem Rumpf. Dasselbe Verhältniss besteht jeweilen auch zwischen den Bewegungen der entsprechenden Punkte in der z-Richtung zu einander und gegenüber einer qv-Ebene, welche sich mit der mittleren Geschwindigkeit des Ganzen gleichförmig bewegt.

b. Die Oscillationen des gemeinsamen Schwerpunctes.

Sie hängen ab von der Form der Curve der resultirenden äusseren Einwirkungen auf das System, die verticalen Oscillationen von der Curve der verticalen, die z-Oscillationen von derjenigen der z-Componenten. Aber nicht bloss die Form der Curve ist von Einfluss, sondern auch die Dauer der Periode.

Bei ähnlicher Form der Curve der v-Componenten müsste die Höhe der verticalen Excursion des Ganzen dem Quadrat der Zeit T einer Periode porportional sein. Würde z. B. die Dauer der Hebung stets die Hälfte des Niederschlages betragen, und würde jederzeit der ganze verticale Widerstand gleichmässig während der Hälfte der Zeit des Niederschlages oder während $\frac{1}{3}$ der Periode und nur in dieser wirken, so würde sich bei 2 Flügelschlägen pro Secunde eine verticale Excursion des Rumpfes von 20 cm. ergeben, bei 4 Flügelschlägen wäre sie 5 cm., bei 8 Schlägen 1,25 cm. u. s. w.

Bei der gleichen Dauer einer Periode hängt die Excursion des Ganzen davon ab, wie die Curve sich zu der geraden Linie verhält, welche parallel zur Abscissenaxe mit dieser ein gleich grosses Kräftefeld bildet; je höher sie über diese Linie sich erhebt und unter sie sinkt, desto grösser ist im Allgemeinen die Excursion.

c. Ausnutzung grösserer Rumpfoscillationen.

Es wird sich in den folgenden Abschnitten, welche der Untersuchung der Kräfte und der Arbeitsleistung gewidmet sind, zeigen, dass die Wirkung der Schwere am Flügel zum Theil für die Vorwärtsbeschleunigung desselben und damit für die Locomo-

tion des Ganzen nutzbar gemacht wird. Man kann sich vorstellen, dass der Flügel beim Niederschlag, bei welchem er ja zumeist auch absolut abwärts bewegt wird, wie auf einer schiefen Ebene vorwärts abwärts gleitet, wobei die Schwere mithilft seine Vorwärtsbewegung zu beschleunigen, und dass zu irgend einer Zeit diese Vorbewegung, also auch der Antheil, den die Schwere an ihr hat, in irgend einer Weise nützlich verbraucht wird. Beim Rumpf und bei der Flügelbais kann von einem derartigen Verhalten keine Rede sein, so lange sie jederzeit mit (wenn auch noch so wenig) supinirten Flächen gegen die Luft gehen. Der Gedanke liegt nun nahe, dass bei grösseren Oscillationen des Rumpfes auch für ihn und die zunächstliegenden, mit ihm bewegten Theile des Flügels durch pronatorische Umstellung die Möglichkeit einer derartigen Wirkung gegeben sei.

Ich habe leider gar keine Erfahrung darüber, wie die grossen Seevögel mit kleinem Körper und sehr langen Schwingen sich beim Fliegen (mit Flügelschlägen) verhalten. Bei Möven ist mir eine periodische pronatorische Neigung des Rumpfes nicht aufgefallen. Wohl aber habe ich die seinerzeit für mich schwer verständliche Beobachtung verzeichnet, dass zu Anfang des Niederschlages des Flügels die Flügelbasis allein etwas pronirt ist. Ist dem so, dann könnten diejenigen Theile des Flügels, welche wesentlich den oscillatorischen Bewegungen des Rumpfes folgen, in ebenderselben Weise die Wirkung der Schwere zur Vorbewegung ausnützen wie die übrigen, aber aus Gründen, die sich alsbald ergeben werden, nicht gleichzeitig mit den äusseren Theilen des Flügels. Erst würde die Basis des Flügels pronirt werden, etwas später erst, während der innere in Supinationsstellung übergeht, der äussere Theil des Flügels.

Von vornherein war man vielleicht geneigt zu erwarten, dass der Vogel in manchen Fällen über die Luft dahingleite, wie ein Nachen über breite Wellen, dass er in Rumpf und Flügel vorn übergeneigt vorwärts abwärts sinke, sich allmählig horizontal stelle und mit mehr und mehr supinirten Flächen wie ein Drache gleichsam auf der andern Seite des Wellenthals wieder emporschiesse; indem sich dann eine relative Abwärts- und Rückwärtsbewegung des Flügels hinzugeselle, gewinne das Thier das alte Niveau und dieselbe Horizontalgeschwindigkeit wieder. Ein solcher Verlauf der einzelnen Perioden des Flügelschlages in vollkommen gleichmässig bewegter oder ruhender Luft ist vielleicht beim Albatros zu beobachten, ich weiss es nicht, kommt aber jedenfalls

nur unter ganz besonders günstigen Verhältnissen bei sehr grossen, grossflügligen Fliegern in Betracht. Es lässt sich einsehen, warum. Ich will hier nicht untersuchen, ob mit einer derartigen Form des Fluges ein wirklicher Vortheil für den Vogel verbunden ist. Es genügt zu wissen, dass sie nur möglich ist, wenn äussere Kräfte die Umstellung der Flächen besorgen. Durch relative Vor- oder Rückführung der Flügel kann nun zwar, wie später noch genauer erörtert werden soll, der drehende Einfluss des Luftwiderstandes geändert und regulirt werden. Zu dem nothwendigen Effect gebricht es aber meist an der nöthigen Zeit; denn die hebende und vortreibende Wirkung des einzelnen Flügelschlages und demnach auch die Grösse und Dauer jeder einzelnen Auf- und Niederbewegung des Ganzen ist beschränkt. Durch die inneren Kräfte allein aber kann wohl die Umstellung des Flügels besorgt werden, aber nur unter entgegengesetzter Drehung des Rumpfes. Dieser Umstand allein genügt schon, um verständlich zu machen, dass der in Rede stehende Typus des Fluges nicht öfter vorkommt.

Verhalten bei relativ grossem Rumpfgewicht.

Es ergiebt sich ferner, dass ein solcher Typus namentlich da unvortheilhaft ist, wo der Rumpf sich wegen der relativen Grösse seines Gewichtes ähnlich wie der gemeinsame Schwerpunkt bewegen müsste. Hier könnten äussere Kräfte allein am allerwenigsten die nöthige gleichartige Umstellung von Rumpf und Flügel bewirken. Grosse Rumpfoscillationen aber, welche ohne eine derartige Umstellung erfolgen, ohne dass also der Rumpf annähernd dieselbe Neigung zu seinem Trajectorium beibehält, machen ein stärkeres Aufgerichtetsein nothwendig, damit bei der Hebung des Rumpfes nicht sein Rücken gegen die Luft gehe, und vermehren im Ganzen die schädliche rückwärts gerichtete Componente des Rumpfwiderstandes gegenüber der aufwärts gerichteten, — sind also an sich eher zu vermeiden als zu erstreben. Eine Verminderung der verticalen Oscillationen des Rumpfes kommt zu Stande, wenn der verticale Widerstand am Flügel gleichmässiger während der ganzen Periode des Niederschlages erzeugt wird und auch während der Hebung erheblicher Auftrieb stattfindet. Vergrösserung von t gegenüber τ, länger anhaltende und gleichmässige Wirkung des Flügelniederschlages zur Hebung, vermehrte Drachenwirkung von Rumpf und Flügel bei der Hebung, begünstigt durch Verbreiterung der Flügelbasis und durch Supination derselben, endlich eine möglichste Verminderung des dorsalen Luftwider-

standes am Flügel bei der Hebung (Typus des Ruderflügels), solches kommt also unter den grossen Fliegern namentlich denjenigen mit relativ grossem Rumpfgewicht und geringen verticalen Rumpfoscillationen zu.

Verhalten bei relativ kleinem Rumpfgewicht.

Etwas anders verhält es sich mit den Rumpfoscillationen bei verhältnissmässig geringem Körpergewicht. Hier könnten die verticalen Oscillationen des Rumpfes verschwinden, wenn der verticale Widerstand zwischen dem Niederschlage und der darauf folgenden Flügelhebung ein ausgesprochenes Maximum, am Ende der Hebung ein ebensolches Minimum hätten. Es lässt sich nun nicht bezweifeln, bei der Kleinheit des Rumpfes und seiner Flächen, dass der verticale Hauptwiderstand durch die Bewegung des Flügels entwickelt wird. Dieser aber geht, wenn überhaupt, sicher eher zu Ende als zu Anfang der relativen Hebung mit der Ventralfläche gegen die Luft. Verticale Oscillationen des Rumpfes sind demnach nicht zu vermeiden, und zwar fällt der absolute Tiefstand des Rumpfes sicher noch in den Verlauf des relativen Niederschlages. Die Gegenwirkung der den Flügel niederziehenden Muskeln auf den Rumpf muss wesentlich daran Schuld sein, dass letzterer in seiner Abwärtsbewegung gehemmt und emporgerissen wird. Es ist nun wichtig, dass die Wirkung des Flügelniederschlages nicht durch die relative Gegenbewegung des Rumpfes zu sehr beeinträchtigt werde. Von dem Moment an, wo der Rumpf absolut zu steigen beginnt, wird also die Aktion der niederziehenden Muskeln sehr rasch und energisch sich abspielen müssen, damit der Rumpf nach möglichst kurzer Strecke der Steigung die nothwendige Aufwärts- und Vorwärtsgeschwindigkeit erlangt habe, und nicht ein zu grosser basaler Theil des Flügels von der Abwärtsbewegung gegen die Luft ausgeschlossen werde. Immerhin liegen die Verhältnisse für die Erzeugung des Widerstandes hier ungünstig. So lange dagegen der Rumpf noch sinkt, ist die Wirkung des Flügelniederschlages begünstigt, weil nicht bloss die Spitze, sondern auch die Basis abwärts bewegt wird; dieser Umstand erlaubt die relative Niederbewegung des Flügels anfänglich einzuschränken.

Da der Flügel im Moment, wo der Rumpf seinen tiefsten Stand hat, noch abwärts geht, so hat der Gesammtschwerpunkt dabei seine tiefste Lage noch nicht erreicht. Ist letzteres der Fall, so ist der Rumpfschwerpunkt bereits im Steigen, der Flügel-

schwerpunkt noch im Sinken begriffen. Es fällt das Maximum der verticalen Widerstände ungefähr mit diesem Zeitpunkt zusammen.

Es ergiebt sich ferner bei einiger Ueberlegung, dass der Hochstand des gemeinsamen Schwerpunktes in das Ende der Flügelhebung fallen muss; dass in diesem Moment also der Flügel noch steigt, der Rumpf bereits wieder im Sinken begriffen ist. Wir können demnach die verticale Bewegung der 2 Partialschwerpunkte *s* und *S* und des Gesammtschwerpunktes Σ in der Zeit durch die 3 in Fig. 14 dargestellten Curven erläutern, welche Cur-

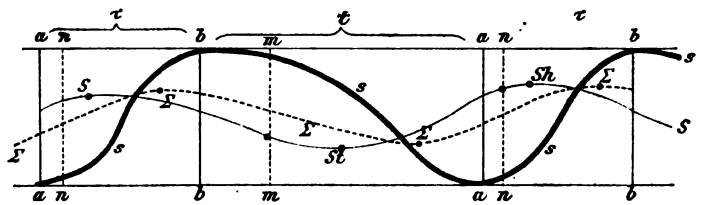


Fig. 14.

ven nicht mit den wirklichen Trajectorien der 3 Punkte, die ja auch noch von der *z*-Bewegung abhängen, verwechselt werden dürfen. Ungefähr da, wo sich die 3 Curven schneiden, liegen die Maxima und Minima des gesammten verticalen Widerstandes oder die tiefsten und höchsten Lagen des Gesammtschwerpunktes Σ (der Curve $\Sigma\Sigma$). Den Zeitpunkten *bb* und *aa* entspechen die höchsten und tiefsten Lagen des Flügelschwerpunktes (Curve *ss*). Die Stellen *St* und *Sh* der Curve *SS* des Rumpfschwerpunktes entsprechen den Maxima und Minima dieser Curve. Bei *mm* haben wir die maximale relative Erhebung des Flügels über den Rumpf, bei *nn* das Ende des relativen Niederschlages. Zwischen *aa* und *nn* findet noch Schliessung des Gelenkes, zwischen *bb* und *mm* Oeffnung statt; die Flügelspitze geht unmittelbar nach *aa* noch einen Moment relativ abwärts, nach *bb* noch einen Moment relativ in die Höhe, und bewegt sich natürlich bei *mm* und *nn* genau parallel dem Flügelschwerpunkt, dem gemeinsamen Schwerpunkt und dem Rumpfschwerpunkt.

Die Reihenfolge dieser verschiedenen Stellungen muss übrigens genau dieselbe sein, auch wenn die Oscillation des gemeinsamen Schwerpunktes, und wenn die relativen Oscillationen des Rumpfes mit diesem geringer sind, so lange nur der Tiefstand des Gesammtschwerpunktes, oder ein ausgesprochenes Maximum der ver-

ticalen Widerstände in die Zeit des Flügelniederschlages fällt. Letzteres wird immer der Fall sein. Wir können also obiges Diagramm auch benutzen, um die Reihenfolge der Hauptereignisse einer Periode des Flügelschlages ganz allgemein zu demonstriren.

Fig. 15 giebt ebenso ganz allgemein die Reihenfolge der Stellungen der Flügellängslinien im Laufe einer Periode in der *qv*-Ebenen-Projection; die thatsächlichen Verschiedenheiten beruhen nur darin, dass in dem einen Fall der Bezirk, in welchem das innere Ende *o* auf und ab oscillirt, grösser, im andern kleiner, ja in vielen Fällen annähernd = 0 ist. Die dunkel ausgezogenen Linien stellen verschiedene Richtungen der Längslinie beim Niederschlage dar, die feinen Linien solche bei der Hebung. Jeden weiteren Commentar zu dieser Figur halte ich für überflüssig.

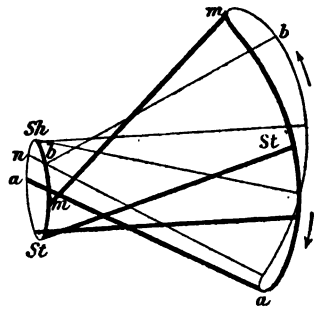


Fig. 15.

Auf die grossen Rumpfoscillationen der grossflügligen Flieger möchte ich noch mit einem Worte zurückkommen.

Weder ist die verticale Bewegung des Rumpfes in Folge der Oscillation gegenüber Σ durch die Oscillation mit Σ ganz anullirt, noch verstärken sich beide Einflüsse jederzeit.

In der Zeit, welche noch vergeht vom Augenblick des relativen Hoch- oder Tiefstandes von *S* bis zum Moment, in dem Σ den höchsten oder tiefsten Stand hat, sind beide Einflüsse conträr, in der übrigen Zeit gleichgerichtet. Der Rumpfschwerpunkt aber steigt und fällt dann eine Zeit lang gleichzeitig mit dem Flügelschwerpunkt, nämlich ungefähr in der ersten Hälfte des Niederschlages und der Hebung, während er sich in dem Rest der beiden Zeiten entgegengesetzt zu *s* verhält. Wie der Rumpf verhalten sich die zunächst gelegenen Theile des Flügels. Die gleichartigen Wendepunkte der Trajectorien von Rumpf- und Flügelschwerpunkt liegen um so weiter auseinander, die entgegengesetzten um so näher bei einander, je geringer die Oscillationen des gemeinsamen Schwerpunktes sind, oder je mehr die tiefste Lage des letzteren mit dem Anfang des Flügelniederschlages zusammenfällt (vgl. Fig. 14).

Soll der Luftwiderstand möglichst an der Unterseite des

Flügels entwickelt werden, so müssen dessen Flächen sich ihren Trajectorien mehr oder weniger anschmiegen. Daraus ergiebt sich die Nothwendigkeit einer grossen Torsionsfähigkeit des Flügels bei Vögeln mit relativ kleinem Rumpfgewicht. Am Ende der (absoluten) Hebung des Flügels wird der Flügel aussen supinirt sein müssen, während seine Basis schon pronirt sein kann; im Beginn des Niederschlages können die Flächen der Basis und Spitze sich ähnlicher verhalten; während die Pronation an der Spitze zunimmt, muss sie an der Basis verschwinden. Gegen Schluss des Niederschlages hat man Pronation der Flügelendflächen bei Supination der Basis zu erwarten. Die maximale Torsion des Flügels mit Zunahme der Pronation nach aussen muss sich gegen Schluss des Niederschlages, die maximale Torsion im umgekehrten Sinn gegen Schluss der Hebung zeigen. (Diese Maxima treten um so früher, schon um die Mitte der Zeiten ein, je weniger die Oscillationen des Gesammtschwerpunktes die relativen Oscillationen des Rumpfschwerpunktes corrigiren). Es ist bekannt, dass der Flügel der Möven sich wirklich durch eine grosse Torsionsfähigkeit auszeichnet. (Bezügl. dieser Verhältnisse vgl. Pettigrew: Diese Schrift pg. 60, und Marey, la machine animale pg. 219 u. pg. 285 u. ff.; beide Autoren haben über die Torsion des Flügels und ihre Abänderung sehr Bemerkenswerthes geltend gemacht. Marey lässt die Basis des Flügels stets supinirt sein, Pettigrew dagegen stets umgekehrt geneigt wie die äusseren Theile des Flügels).

II.

Das Wechselspiel der Kräfte.

Einleitendes.

Unser nächstes Ziel ist, die bei einer bestimmten bekannten Form der Flugbewegung in jeder einzelnen Phase wirksamen inneren Kräfte nach Grösse, Richtung und Ort des Angriffes kennen zu lernen. Dabei beschränken wir uns auf die Untersuchung der zwischen Rumpf und Flügel wirkenden Kräfte und vernachlässigen diejenigen, welche zwischen verschiedenen Theilen des Flügels oder des Rumpfes zur Geltung kommen. Wir nehmen also zunächst an, dass die Formveränderungen der Flügel oder des Rumpfes selbst keinen nennenswerthen locomotorischen Effekt hervorbringen und dass die Hauptaktion am Schultergelenk vor sich geht. Später erst soll kurz besprochen werden, in welcher Weise ein Theil der Aktion im Schultergelenk durch Aktion im Handgelenk ersetzt werden kann. Der Rumpf gilt uns zunächst als die eine Partialmasse, die beiden Flügel als zwei weitere Partialmassen.

1) Rumpf mit Hals, Kopf und Schwanz soll kurzweg als Rumpf bezeichnet werden $= R$.
   Die beiden Flügel zusammen mit F, wobei R und F die Gewichte dieser Theile bedeuten.
   Das Gewicht des ganzen Körpers sei $= P$.

Jede innere Kraft zwischen Flügel und Rumpf, mag sie in einem Muskelzug, in Spannung von Bändern, von Haut oder irgend welchen Weichtheilen, oder in dem Druckwiderstand von Weichtheilen, in dem Drucke von Knochen gegen einander, oder in Reibungswiderständen am Gelenk bestehen, hat immer eine Wirkung nach zwei Seiten, Action und Reaction. Die Action ist jeweilen absolut gleich der Reaction. Wird die Wirkung der innern Kraft auf die Flügel in einem bestimmten Moment mit p bezeichnet, so ist die zugehörige Gegenwirkung auf den

Rumpf $= -p$. Beide Kräfte wirken in derselben Richtungslinie, aber in entgegengesetzter Richtung. Wir denken uns für irgend eine Phase die an der einen Körperhälfte wirksamen Kräfte verdoppelt; die Partikel der andern Körperhälfte in diejenigen dieser ersten Körperhälfte hineingeschoben; die mediane Grenzfläche des so vereinfachten Systems genöthigt, stets in derselben Sagittalebene zu verbleiben.

Wir werden also in Zukunft, wo wir von dem Flügel sprechen, darunter in der Regel die zu einem einzigen Flügel vereinigten Flügelmassen beider Seiten verstehen. Dasselbe gilt von den Kräften.

Aehnlich wie man für irgend einen Balkenquerschnitt eines Dachstuhls, einer Brücke u. dgl. die Grösse der in ihm wirksamen inneren Kräfte berechnen kann, sich zu diesem Behufe den Balken an diesem Querschnitt wirklich quer durchschnitten denkt und untersucht, welche Kräfte auf das Schnittende jedes Theilstückes wirken müssen, um dasselbe in seiner Lage zu erhalten, so kann man bei den dynamischen Problemen ebenfalls zu Werke gehen. Ich habe von diesem Princip der Untersuchung in meiner Abhandlung über die Ortsbewegung der Fische etc. bereits ausgiebigen Gebrauch gemacht.

Beim Vogel ist zwischen dem Oberarmkopf und seiner Gelenkkapsel schon von Natur eine Spalte vorhanden, hier kann es sich natürlich nur um Druck und Gegendruck handeln; die sämmtlichen wirklichen Verbindungen von Rumpf und Flügel denkt man sich quer durchschnitten. Die an solchen Querschnitten wirkenden inneren Kräfte und Gegenkräfte können hier sowohl in Zug und Gegenzug, als in Druck und Gegendruck bestehen. Von welcher Art, Grösse und Richtung sind nun in irgend einer Phase der Bewegung die Kräfte, welche vom Rumpf aus im Gelenk auf das Gelenkende des humerus und in den verschiedenen Muskelschnittflächen auf die dem Flügel zugetheilten Muskelenden einwirken? Wie gross sind also die inneren Kräfte am Flügel? und wie verhalten sich ihre Gegenkräfte, die inneren Kräfte am Rumpf? Wir wollen uns zunächst im Folgenden einen ersten Ueberblick hierüber verschaffen. Die inneren Kräfte am Flügel zusammen mit den äusseren Kräften an demselben bedingen die resultirende Bewegung resp. Bewegungsänderung des Flügels. Wir fassen zunächst nur ins Auge die Aenderung der Bewegung des Flügelschwerpunktes und lassen die Drehbewegung der ganzen Flügelmasse um den Schwerpunkt und die Configurationsänderung,

welche der Flügel daneben noch erfahren kann, gänzlich ausser Betracht. Die Einwirkung der Kraft auf den Bewegungszustand des Schwerpunktes einer Masse aber verhält sich so, als ob die Kraft in gleicher Grösse und Richtung auf die im Schwerpunkt concentrirt gedachte Masse einwirkte.

Kennt man die resultirende Bewegung des Flügelschwerpunktes, und die Grösse und Richtung der äusseren Kräfte, so kann daraus die nothwendige Grösse und Richtung der inneren Kräfte, d. h. ihrer resultirenden Einwirkung auf den Schwerpunkt gefunden werden. Es bleibt aber noch fraglich, in welcher Grösse und Richtung jede einzelne innere Kraft auf den Flügel einwirkt und an welchen Punkten jede angreift, also auch die Art und Weise, wie die verschiedenen Stellen der Flügelrumpfverbindung betheiligt sind.

Wir verzichten fürs erste auf diese Kenntniss und beschränken uns darauf,

Die resultirende Einwirkung der inneren Kräfte auf den Rumpf- und Flügelschwerpunkt zu ermitteln, und zwar fassen wir zunächst nur die verticalen Kräfte ins Auge.

α. Uebersicht über die Wirkung der äusseren und der gesammten inneren Kräfte auf Flügel und Rumpfschwerpunkt.

A. Die verticale Einwirkung der äusseren und der resultirenden inneren Kräfte am Flügel auf den Flügelschwerpunkt.

Im Folgenden soll jederzeit unter der Zeit des Flügelniederschlages t derjenige Theil der Periode T verstanden sein, in welchem sich der Flügelschwerpunkt absolut abwärts bewegt. Wie aus dem vorigen Abschnitte hervorgeht, beginnt dieser Abschnitt der Periode um etwas, wenn auch nur um ein Weniges, früher als die relative Niederbewegung des Flügels (Schliessung des Schultergelenkes) und hört um einen Moment früher auf.

Aehnlich verhält sich der Zeitabschnitt der Flügelhebung τ (der Hebung des Flügelschwerpunktes) zu der relativen Flügelhebung (Oeffnung des Schultergelenkes); die Flügel- Vor- und Rückführung aber soll zeitlich begrenzt sein durch die Augenblicke, in denen die s-Geschwindigkeit des Flügelschwerpunktes maximal und minimal ist.

Mit Bezug auf die in der folgenden Darstellung vielfach vorkommenden Buchstabengrössen, welche durch Indices in kleineren Lettern charakterisirt sind, sei zum Voraus bemerkt, dass z. B. *f* und *r* im Index bedeutet: am Flügel, am Rumpf wirkend, *fh* und *rh:* Flügel hebend, Rumpf hebend: *fn* und *rn,* Flügel- resp. Rumpfniederziehend, *v, z* und *q,* dass es sich um die Componente in der *v*-, *z*- oder *q*-Richtung handelt. Ist im Index der Buchstabe *t* oder τ oder *T* beigefügt, so bedeutet dies, dass die gesammte Wirkung der durch den übrigen Theil des Zeichens charakterisirten variabeln Kraft in der Zeit *t,* τ oder *T* gemeint ist. Ist die Kraft ς constant, so wird natürlich die Gesammtwirkung derselben während einer bestimmten Zeit ϑ einfach durch das Produkt $\varsigma . \vartheta$ ausgedrückt.

So bedeutet z. B., wenn wir die inneren Kräfte mit *I* bezeichnen, der Ausdruck I_{fnt} die gesammte Wirkung derjenigen inneren Kräfte am Flügel, welche während des Flügelniederschlages niederziehend auf denselben einwirken, I_{fht} die Wirkung der den Flügelhebenden inneren Kräfte während des Niederschlages u. s. w.

a) Der Flügel beim Niederschlag hat zu Anfang und zu Ende die Geschwindigkeit 0 in verticaler Richtung. Die Summe aller verticalen Krafteinwirkungen während des Niederschlages = 0.

Bei der Abwärtsbewegung erzeugt der Flügel mit seiner Unterfläche einen Widerstand W_f, dessen verticale Componente W_{fv} aber nicht einzig und allein von der Abwärtsbewegung des Flügels abhängt. Vielmehr hängt der Widerstand W_f senkrecht zu den gegen die Luft bewegten Oberflächen ab von der Grösse der Fläche *F,* von der Geschwindigkeit *V,* mit welcher die Fläche bewegt wird, von dem Winkel α, den die Bewegungsrichtung mit der Fläche bildet und von einem Faktor ζ, der für die Luft vor der Hand von uns als constant angenommen werden kann ($W_f = \zeta . V^2 . \sin^2 \alpha . F.$). Da die Unterflächen des Flügels beim Niederschlag bald pronirt, bald supinirt, bald nach aussen, bald nach innen gewendet sind, so kommt neben der verticalen Bewegung auch die Vorbewegung und die quere Bewegung in Betracht. So kommt es, dass W_f und auch die verticale Componente W_{fv} weder zu Anfang noch zu Ende des Niederschlages = 0 ist.

Am ungünstigsten sind die Verhältnisse zu Ende des Niederschlages, wo an der Spitze selbst die Abwärts- und Vorwärtsbewegung klein, wenn nicht = 0 ist, und die basalen Theile des Flügels zwar rasch vorwärts, aber noch wenig aufwärts und mit

relativ kleinerem Winkel α gegen die Luft gehen. Zu Anfang des Niederschlages dagegen ist die Vorwärtsbewegung der Flügelspitze maximal, und die Basis des Flügels ist schon in Abwärtsbewegung begriffen. Der Winkel α ist überall ein günstiger. Der gesammte W_f also, gleich von Anfang an erheblich gross, steigt allmählich zu einem Maximum, um dann rasch und bis auf kleinen Betrag zu sinken (s. u. Fig. 16).

Abwärts treibend wirkt am Flügel sicher die Schwere, und zwar während der ganzen Zeit, mit gleichmässiger Kraft. Sie würde für sich allein dem Flügel eine Geschwindigkeit $g.t$ verleihen oder eine Bewegungsmenge $\frac{F}{g} \cdot g.t = F.t.$

Wie verhalten sich die inneren Kräfte? Da der verticale Widerstand am Flügel sicher grösser ist als am Rumpf, also eine Oeffnung des Gelenkes an sich bewirken würde, die Schwere an sich an der Stellung zwischen Flügel und Rumpf nichts ändert, thatsächlich aber eine Schliessung des Gelenkes, d. h. eine relative Flügelniederbewegung stattfindet, so müssen zu Anfang des Niederschlages innere Kräfte vorhanden sein, welche den Flügel niederziehen und den Rumpf heben.

Abwärts treibend wirken also zu Anfang die Schwere und die inneren Kräfte I_{fnt}. Anfangs ist die absolute Bewegung des Flügels abwärts eine beschleunigte; daraus folgt, dass die abwärts ziehenden Kräfte über die vertical aufwärts wirkenden Componenten des Widerstandes am Flügel das Uebergewicht haben. In Folge davon erhält der Flügel eine bestimmte Geschwindigkeit abwärts. Diese ist am Schlusse des Niederschlages anullirt; gegen diesen Schluss hin müssen demnach die aufwärts gerichteten Kräfte das Uebergewicht haben. Es fragt sich, wie die Hemmung am Schluss bewerkstelligt wird. Wir sind der Meinung, dass der W_f allein nicht genügt, um den in Abwärtsbewegung begriffenen und von der Schwere immerfort nach abwärts beschleunigten Flügel vollständig aufzuhalten. Es müssen die Niederzieher des Flügels ihre Spannung mässigen oder gänzlich aufgeben, bevor der Flügelschwerpunkt die absolute tiefste Lage erreicht hat, geschweige denn die relativ tiefste Stellung. Zweitens aber müssen statt dessen neue umgekehrt gerichtete Kräfte im Wirksamkeit treten, welche die Abwärtsbewegung des Flügels hemmen; dies kann nur geschehen, indem zwischen Rumpf und Flügel ein Bewegungsaustausch unter Wachrufung innerer Kräfte stattfindet; was der Flügel an Abwärtsbewegung verliert, wird auf den Rumpf

übertragen; um so viel wird der Rumpf in seiner Aufwärtsbewegung gehemmt. Wo diese innere Uebertragung geschieht, kommt zunächst nicht in Frage; es könnte der Flügel bei seiner relativen Niederbewegung entfernt von dem Gelenk durch Weichtheile des Rumpfes gehemmt werden, oder durch die bei einem gewissen Grade der Verlängerung sich mehr und mehr spannenden Hebemuskeln. Sicher aber findet dabei Druck und Gegendruck an der Einlenkungsstelle des Humerus statt. Der Rumpf hat ja eine Aufwärtsbewegung gewonnen, verharrt in derselben, auch wenn die Flügelniederzieher nicht mehr wirken, und reisst die Basis des Flügels, successive auch immer weiter aussen gelegene Theile mit empor.

Zum Schluss des Niederschlages wirken also auf Flügel und Rumpf innere Kräfte umgekehrt wie zu Anfang; sie ziehen den Flügel nach oben. Wir wollen ihre Einwirkung mit I_{fht} bezeichnen, die ganze abwärts treibende Wirkung der inneren Kräfte am Flügel aber mit I_{fnt}.

Alle Kräftewirkungen auf den Flügel während der Dauer des Niederschlages sind zusammen $= 0$. Wenn wir mit den Buchstabengrössen nur die absoluten Werthe der Einwirkungen bezeichnen, so ist

$$\text{I.} \quad I_{fht} + W_{ft} - F.t - I_{fnt} = 0.$$

b) Der Flügel bei der Hebung. Die Beurtheilung der Widerstände, welche den aufsteigenden Flügel treffen, ist sehr schwierig. Wir sind der Meinung, dass auch noch bei den gross- und langflügeligen, rasch fliegenden Thieren die Spitze des Flügels, wenigstens im Beginn der Hebung, mit der dorsalen Seite voran gegen die Luft geht und also einen abwärts gerichteten W erzeugt. In grösserem Maasse muss dies bei den im Verhältniss rascher mit den Flügeln schlagenden, kleinflügeligen Fliegern der Fall sein. Denn bei diesen muss im allgemeinen die verticale Bewegung des Flügels im Verhältniss zur horizontalen etwas grösser sein, wie schon angedeutet wurde.

Der von der Basis des Flügels an seiner Unterfläche erzeugte Widerstand aber ist im ersten Moment der Flügelhebung noch nicht sehr erheblich. Man muss deshalb für wahrscheinlich halten, dass bei kleinflügeligen Vögeln mit verhältnissmässig raschen Flügelschlägen zu Anfang der Hebung der resultirende Widerstand am Flügel eine abwärts gerichtete verticale Componente hat. Dasselbe gilt auch für gross- und langflügelige Vögel, wenn sie ihre horizontale Geschwindigkeit einschränken (für den Falken

z. B., welcher sich rüttelnd in derselben Höhe und fast an derselben Stelle hält) und auch dann, wenn sie, statt horizontal zu streichen, schräg aufsteigen. Doch gehört diese Bewegung nicht eigentlich in den Kreis unserer Betrachtungen.

Die Schwere wirkt in der Zeit τ am Flügel mit dem Betrag $F.\tau$.

Aus den Verhältnissen des Widerstandes ergiebt sich, dass für den Anfang der relativen und absoluten Hebung des Flügels innere Kräfte mitwirken müssen. Wir bezeichnen ihren Einfluss mit $I_{fh\tau}$. Derselbe wird geringer sein können, wenn ein grosser Widerstand die Unterfläche des Flügels trifft und zur Hebung gegenüber dem Rumpfe beiträgt.

Endlich wird am Schluss der Hebung, wo der Widerstand an der Unterfläche des mehr oder weniger supinirten Flügels den Einfluss der Schwere des Flügels entgegenwirkt, in der Regel eine innere Wirkung und Gegenwirkung derart stattfinden, dass der aufwärts schnellende Flügel nicht durch die Schwere allein in seiner Bewegung aufwärts gehemmt wird, sondern auch von Seiten des Rumpfes. Innere Kräfte, die im Sinne der Niederziehung des Flügels wirken, werden besonders da erheblich sein, wo ein sehr rascher Vollzug der Hebung des Flügels aus andern Gründen geboten ist. Diese Wirkung sei mit $I_{fn\tau}$ bezeichnet. Mit $W_{f\tau}$ sei die resultirende Wirkung des Widerstandes am Flügel bezeichnet, welche aufwärts gerichtet ist. Alle Kraftwirkungen am Flügel sind zusammen für die ganze Hebung $= 0$.

Demnach erhalten wir folgende Gleichung:

$$\text{II.} \qquad I_{fh\tau} \overset{+}{(-)} W_{f\tau} - F.\tau - I_{fn\tau} = 0.$$

B. Die verticale Einwirkung sämmtlicher Kräfte am Rumpf auf den Rumpfschwerpunkt.

Die Wirkung der Schwere auf den Rumpf in der Zeit t ist gleich $R.t$.

Die verticale Componente des Rumpfwiderstandes ist wohl so gut wie immer aufwärts gerichtet. Die ganze Einwirkung des Rumpfwiderstandes beim Flügelniederschlag $= W_{rt}$. Die inneren Kräfte am Rumpf sind natürlich die Gegenkräfte zu denen am Flügel, im Anfange des Niederschlages also aufwärts gerichtet (I_{rht} absolut $= I_{fnt}$); am Ende des Niederschlages ziehen sie den Rumpf abwärts (I_{rnt} absolut $= I_{fht}$).

Wir haben aber noch zu berücksichtigen, dass in manchen

Fällen der Rumpf zu Anfang des Niederschlages eine Abwärtsgeschwindigkeit c besitzt, welche einer Krafteinwirkung oder einem Bewegungsmoment $R.c$ entspricht, und zu Ende des Niederschlages eine Aufwärtsgeschwindigkeit c_1, entsprechend einer Krafteinwirkung $R.c_1$. Unter dem Einfluss der äusseren und inneren Kräfte am Flügel wird die abwärts gerichtete Bewegung vernichtet und die aufwärts gerichtete erzeugt. Es ist also:

$$\text{III.} \quad I_{rht} + W_{rht} - I_{rnt} - R.t = R.c + R.c_1.$$

In ähnlicher Weise findet man für die Kräfte, die am Rumpfe während der Flügelhebung wirken,

$$\text{IV.} \quad I_{rh\tau} + W_{rh\tau} - I_{rn\tau} - R.\tau = R.c_1, + R.c.$$

Zusammenfassung.

Bezeichnen wir für irgend eine Phase

$$I_{rh} = I_{fn} \text{ mit } I_p, \; I_{rn} = I_{fh} \text{ mit } I_s,$$

so ergeben sich folgende Gleichgewichtsgleichungen:

1) für die Kräfte am Flügel während des Flügelniederschlages

$$I_{st} + W_{fht} - Ft - I_{pt} = 0$$

2) für die Kräfte am Flügel während der Hebung

$$I_{s\tau} + W_{fh\tau} - F.t - I_{s\tau} = 0$$

3) für die Kräfte am Rumpf während des Flügelniederschlages

$$I_{pt} + W_{rht} - I_{st} + R.t = R.c_1 + R.c,$$

4) während der Flügelhebung

$$I_{p\tau} + W_{rh\tau} - I_{s\tau} - R.\tau = R.c_1 + R.c.$$

Sodann ist Gleichgewicht der Kräfte am Flügel während einer ganzen Periode vorhanden, also

$$5) \quad I_{pT} + F.T - I_{sT} - W_{fhT} = 0$$

ebenso am Rumpf, also ist

$$6) \quad I_{sT} + R.T - I_{pT} - W_{rhT} = 0.$$

Natürlich besteht dann also Gleichgewicht aller äusseren Kräfte pro Periode; es ist also

$$F.T + R.T = P.T = W_{rhT} + W_{fhT}$$

und $$F.T - W_{rhT} = W_{fhT} - R.T.$$

β. Curven dieser Kräfte.

Alle diese Gleichungen geben keinen Aufschluss über die während einer Periode T oder während der Zeiten t und τ vom Ganzen oder vom Rumpf und Flügel zurückgelegten Wege. Sie gelten in ganz derselben Weise nicht bloss für den horizontalen Normalflug, sondern auch für langsames Auf- oder Absteigen mit

regelmässigen Flügelschlägen. Bei steilerer Flugbahn mag diese und jene der zu berücksichtigenden Einwirkungen = 0 oder umgekehrt gerichtet werden.

Glücklicherweise enthalten die aufgestellten Gleichgewichtsgleichungen nicht Alles, was wir über das Wechselspiel der inneren und äusseren Kräfte feststellen können. Es ist unzweifelhaft möglich, vorausgesetzt, dass die Gesetze des Luftwiderstandes im Allgemeinen annähernd bekannt sind, aus der Kenntniss der Form des Apparates und seiner Bewegung, also aus der Kenntniss der Trajectorien seiner Oberflächenpunkte die Curve des Luftwiderstandes einerseits, des Flügelwiderstandes andererseits (der horizontalen Componenten sowohl, als der verticalen) zu construiren — für einen gegebenen Fall von gleichförmiger Bewegung. Die Einwirkung der Schwere auf beide Partialmassen ist natürlich leicht zu ermitteln. Endlich ist dabei auch die Bewegung des gemeinsamen Schwerpunktes und diejenige der Partialschwerpunkte gegeben, sodass sich auch die Curve der resultirenden (horizontalen und verticalen) Einwirkungen auf die Gesammtmasse und auf die Partialmassen muss construiren lassen.

Damit ist alles Nothwendige gegeben, um für jeden einzelnen Moment die Grösse der Einwirkung der inneren Kräfte auf jede der beiden Partialmassen festzustellen. Wir wollen diesen Weg der Untersuchung im Folgenden für den horizontalen normalen Flug und zwar zunächst für die verticalen Kräfte und Bewegungen betreten. Es liefern zwar unsere Untersuchungen über die Form der Bewegung noch keine vollständig genauen und sicheren Anhaltspunkte zur Bestimmung der Widerstandscurven. Mag aber auch in unseren Voraussetzungen Manches irrig sein, die Hauptsache ist, dass gezeigt wird, wie die so mühevollen Untersuchungen über die Form der Bewegung verwerthet werden können.

A. Die auf den Flügel wirkenden verticalen Kräfte in ihrer Abänderung nach der Zeit.

In den folgenden Figuren 16 und 17 sind die Kräfte durch verticale Distanzen (Ordinaten), die Zeiten durch horizontale Distanzen (Abscissen), die Aenderungen der Kräfte durch Curven, die Einwirkungen der Kräfte in bestimmter Zeit durch Kräftefelder dargestellt (s. S. 11).

Die horizontale Distanz t entspricht der Zeit des Flügelniederschlages (Niederbewegung des Flügelschwerpunktes), die Distanz τ der Flügelhebung.

In Fig. 16 ist *abcdefgh* die Curve des vertical nach oben gerichteten Widerstandes am Flügel. Die zugehörige Abscissenaxe ist x-X. Wir haben angenommen, dass in der ersten Hälfte der Flügelhebung der ganze Flügelwiderstand eine Zeit lang resultirend nach oben wirke (von *d* bis *f*), indem die schädlichen Widerstände an der oberen Seite des Flügelendes über die nützlichen an der Flügelbasis überwiegen. Am Ende der Hebung gewinnt der nützliche verticale Widerstand einen positiven Werth, indem er resultirend nach oben gerichtet ist. Er ist zu Anfang der Flügelsenkung schon erheblich, erreicht in der zweiten Hälfte derselben seinen maximalen Werth und ist am Ende der Senkung fast $=0$.

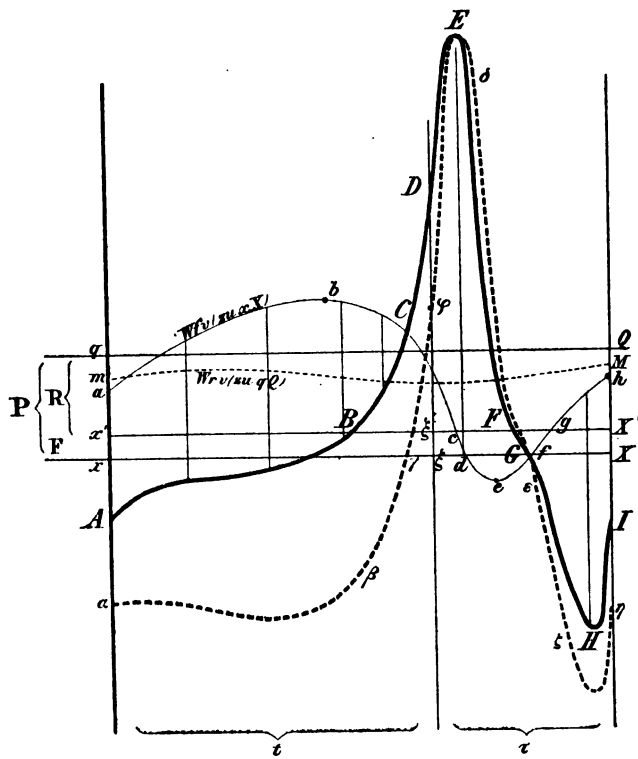


Fig. 16.

Die ganze (aufwärts gerichtete) Einwirkung des Flügelwiderstandes in einer Periode wird gemessen durch das Kräftefeld $xabcdx + fghxf - defd$. Dieses Feld muss zusammen mit

dem Kräftefeld des aufwärts gerichteten Rumpfwiderstandes dem Kräftefeld der abwärts wirkenden Schwere des ganzen Systems gleich sein. Ziehen wir nun über xX Parallelen zu dieser Axe in den Abständen $xq = P$ und $xx' = F$, $(x'q = R)$, dann ist das Kräftefeld der Schwere $= xqQXx$. Der Rumpfwiderstand W_{rv} wird gemessen durch den Abstand der fein punktirten Curve mm von qQ. Was von der Einwirkung (oder vom Kräftefeld) der Schwere nicht durch den Rumpfwiderstand anullirt wird, muss durch den Flügelwiderstand im Gleichgewicht gehalten werden. Die Einwirkung des letzteren, welcher durch den Abstand der Curve $abcd\ldots$ über xX gemessen wird, muss also dem Felde zwischen mm und xX gleich sein, was in unserer Figur ziemlich genau der Fall ist.

Die durch den Abstand der Curve mm von qQ dargestellten, auf den Rumpf wirkenden resultirenden verticalen Widerstände sind überall als positiv, d. h. als nach oben gerichtet, angenommen, am grössten für den Beginn der Flügelhebung, wo der Rumpf die grösste Horizontalgeschwindigkeit hat, am kleinsten kurz vor der Mitte des Niederschlages, wo die Horizontalgeschwindigkeit erschöpft ist und der Rumpf aus der absteigenden Bewegung in die aufsteigende übergeht.

Betrachten wir nun die Kräfte am Flügel für sich, so kommt neben der aufwärts gerichteten Wirkung des Flügelwiderstandes die abwärts gerichtete Wirkung des Flügelgewichtes zunächst in Betracht. Letztere ist durch das Kräftefeld $xx'X'Xx$ gemessen. Flügelwiderstand und Flügelgewicht zusammen werden natürlich gemessen durch $(abc\ldots.h$ zu $xX) - xx'X'Xx$ oder durch $abc\ldots h$ zu $x'X'$. Die resultirende Bewegungsänderung des Flügelschwerpunktes hängt ausser von diesen Kräften nur noch ab von der Einwirkung der inneren Kräfte am Flügel.

Wenn die Form der Bewegung bekannt ist, so muss sich beurtheilen lassen, wie gross in jeder Phase die nothwendige resultirende verticale Beschleunigung des Flügelschwerpunktes ist. Wir haben dies in Fig. 16 durch den Abstand der Curve $ABC\ldots.I$ von $x'X'$ dargestellt. Die unserem Beispiel zu Grunde liegenden Verhältnisse mögen ungefähr realisirt sein bei einem Thier von dem Gewichte einer Taube, aber einem mehr mövenartigen Bau, so dass der Rumpf relativ leichter ist und die Rumpfoscillationen mehr ins Gewicht fallen. (Bei grösseren Thieren mit selteneren Flügelschlägen würde der mittlere Abstand der Curve $ABC\ldots I$ von $x'X'$ im Verhältniss zu

dem Abstand xx' etc. kleiner sein müssen). Zu Beginn und zu Ende des Niederschlages und der Hebung ist die Geschwindigkeit des Flügelschwerpunktes = 0. Beim Niederschlage muss also zunächst eine resultirende abwärts treibende Wirkung stattfinden, dann eine Hemmung der Abwärtsbewegung. Die resultirend beim Niederschlag erworbene Geschwindigkeit muss = 0 sein. Daraus folgt, dass das Kräftefeld ABx^1A dem Kräftefeld $BCD\xi'B$ absolut gleich, dem Sinn nach entgegengesetzt sein muss. Aehnliches gilt für die resultirende Wirkung auf den Flügel bei der Hebung. Hier ist die resultirende Wirkung zuerst aufwärts, dann abwärts gerichtet. Das Kräftefeld $\xi'DEF\xi'$ muss absolut $= FGHIX'F$ sein.

Diesen Anforderungen genügt unsere Curve $AB....I$. Ausserdem aber muss dieselbe noch anderen Postulaten gerecht werden.

Es muss zweitens der pro Periode vom Flügelschwerpunkt zurückgelegte Weg = 0 sein, und zwar muss dies in der Weise erreicht werden, dass der bei dem Niederschlag nach unten durchmessene Weg dem bei der Hebung in der umgekehrten Richtung durchmessenen gleich ist. Construirt man die Wegkörper nach den in der Einleitung auseinandergesetzten Grundsätzen, so wird man zunächst erkennen, dass der in der ganzen Periode durchmessene Weg wirklich bei der gewählten Form der Curve $ABC...I$ annähernd = 0 sein wird. Da nun bei der Hebung in kürzerer Zeit derselbe Weg zurückgelegt wird wie beim Niederschlag, so muss die mittlere und maximale Geschwindigkeit bei der Hebung grösser sein wie beim Niederschlag, was ja auch durch Beobachtung und Registrirversuche bestätigt wird. Die maximale Geschwindigkeit ist in unserem Beispiel vorhanden in dem Augenblick, wo die Abwärts- oder Aufwärtsbeschleunigung = 0 geworden ist und die Einwirkung einer entgegengesetzt gerichteten Kraft beginnt, also bei B und F. Das seit dem Beginn des Niederschlages resp. der Hebung erzeugte resultirende Kräftefeld ist ein Mass für die bis jetzt erlangte Geschwindigkeit; es muss also absolut $ABx'A$ erheblich kleiner sein als $\xi'DEF\xi'$. Auch diesem Umstand ist in unserem Diagramm Rechnung getragen.

Es ist nun leicht zu ermitteln, welche Kraft in irgend einem Moment zu der Einwirkung der Schwere und derjenigen des Luftwiderstandes noch hinzukommen muss, damit die resultirende Einwirkung der in der Curve $ABCDEF$ dargestellten wirklich entspricht. Diese Kraft wird jeweilen durch den verticalen Abstand der Curve $ABCDE$ von der Curve *abcdefgh* dargestellt; wo die

erstere unter der letzteren liegt muss die Kraft abwärts gerichtet sein, wo das Umgekehrte stattfindet, muss sie aufwärts wirken. Der Abstand der Curve $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\zeta\eta$ von der Abscissenaxe xX ist jeweilen dieser Differenz gleich gesetzt; es ist deshalb die letztgenannte Curve die Curve der inneren verticalen, auf den Flügel einwirkenden Kräfte; denn keine anderen als innere Kräfte können die äusseren Kräfte in der postulirten Weise ergänzen. ($ABCbaA + GHIhgG$) oder ($x\alpha\beta\gamma x + \varepsilon\zeta\eta X\varepsilon$) sind die Kräftefelder, welche das Mass der abwärts ziehenden Wirkung der inneren Kräfte auf den Flügel geben, das Kräftefeld $CDEFGedcC$ oder $\gamma\delta\varepsilon\gamma$ misst die aufwärts gerichtete Einwirkung der inneren Kräfte auf den Flügel zu Ende der Flügelsenkung und zu Anfang der Flügelhebung.

$$x\alpha\beta\gamma x = I_{fmt}$$
$$\gamma\xi\varphi\gamma = I_{fht}$$
$$\xi\varphi\delta\varepsilon\xi = I_{fh\tau}$$
$$\varepsilon\zeta\eta\chi\varepsilon = I_{fm\tau}.$$

B. Die auf den Rumpf einwirkenden verticalen Kräfte (Fig. 17).

mM zu qQ in Fig. 17 ist die Curve verticalen Luftwiderstandes W_{rv} am Rumpf; qQ zu $x'X'$ zeigt die Wirkung des Rumpfgewichtes, mM zu $x'X'$ die resultirende, abwärts gerichtete Einwirkung der Schwere und des Luftwiderstandes auf den Rumpf. Die inneren Kräfte am Rumpf sind jeder Zeit absolut gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, wie die inneren Kräfte am Flügel, ihre Wirkung wird durch die Curve $\alpha\beta\gamma \ldots \eta$ zu x'-X' dargestellt.

Alle diese Verhältnisse sind genau nach dem für Fig. 16 gebrauchten Massstab dargestellt. Es ergiebt sich dann als Curve der resultirenden verticalen Einwirkungen auf den Rumpfschwerpunkt die Curve $ABCDE \ldots I$ mit der Linie $x'X'$ als Abscisse. Ihre Ordinaten entsprechen jederzeit den Abständen der beiden Curven $\alpha\beta\gamma \ldots \eta$ und mM. Auch diese Curve muss einer ganzen Reihe von Bedingungen genügen. Der pro Periode vom Rumpf in verticaler Richtung zurückgelegte Weg muss resultirend $= 0$ sein. Ferner muss der vom Rumpf aufsteigend durchmessene Weg dem beim Sinken von ihm durchmessenen gleich sein. Der tiefste Stand des Rumpfes wird in der ersten Hälfte des Niederschlages (bei *Rtstd* Fig. 17), der höchste Stand in der ersten Hälfte der Flügelhebung (bei *Rhstd*) angenommen werden müssen.

Allen diesen Anforderungen genügt unsere Curve $ABC \ldots I$

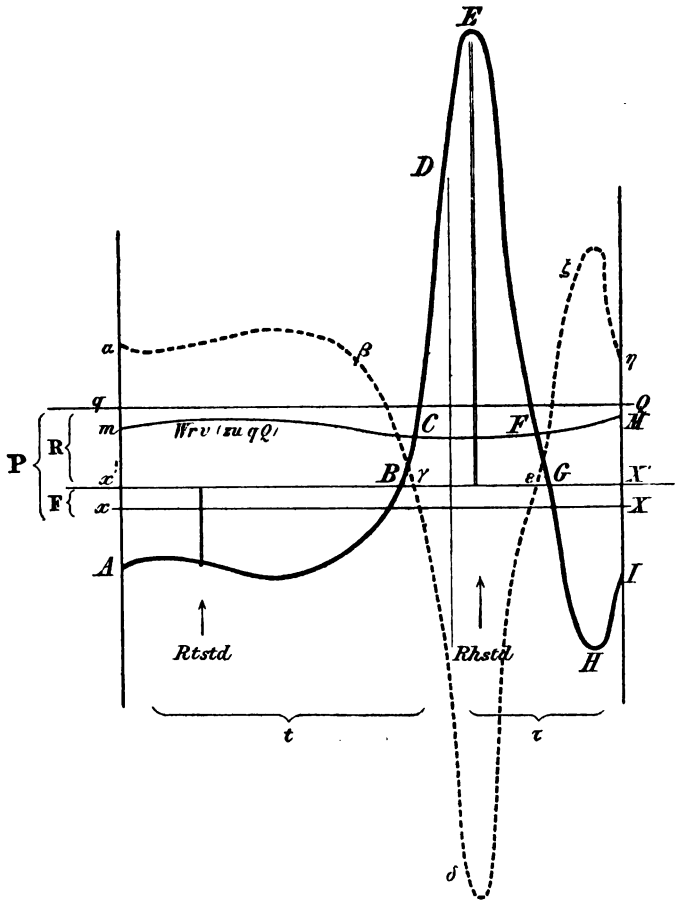


Fig. 17.

in erfreulicher Weise. Berücksichtigt man ferner, dass der Rumpf $3\frac{1}{2}$—4 mal schwerer angenommen wurde als der Flügel, und dass die Curve der resultirenden Kräfte an Rumpf und Flügel in unserem Beispiel einander ziemlich ähnlich sind, so ergiebt sich eine ca. $3\frac{1}{2}$—4 mal geringere verticale Excursion des Rumpfschwerpunktes im Vergleich zu der des Flügelschwerpunktes, oder eine ca. 11 mal geringere im Vergleich zur Flügelspitze. Solches ist bei einem Vogel von verhältnissmässig leichtem Rumpf nichts Absurdes.

Die unseren Curventafeln zu Grunde gelegten Voraussetzungen sind also unter sich in guter Harmonie und können sehr wohl

bei irgend einem bestimmten Flugthier annähernd genau realisirt sein. Wir können demnach auch diese Curventafeln dazu benutzen, um darzuthun, dass bei der Abänderung von irgend einem der verschiedenen Factoren alle andern sich ebenfalls ändern müssen.

Man stelle sich z. B. vor, dass die hebende Wirkung des Luftwiderstandes am Flügel aus irgend einem Grunde, etwa in Folge einer grösseren horizontalen Geschwindigkeit des Ganzen, oder wegen einer grösseren Unterfläche des Rumpfes wächst, so kann der verticale Luftwiderstand am Flügel entsprechend kleiner sein; dann müssen auch die Curven $ABCDE$ und $\alpha\beta\gamma\ \delta\varepsilon\zeta\eta$ in Fig. 16 sich ändern, die resultirende Bewegung des Flügels und die Wirkungsweise der inneren Kräfte muss eine andere sein. Dies nur als Beispiel. Wir werden später in mehr systematischer Weise diese Untersuchungen fortsetzen.

C. Horizontale Kräfte.

Aehnliche Gleichgewichtsgleichungen der Kräfte und ähnliche Curventafeln wie für die verticalen Kräfte müssen sich auch für die horizontalen Kräfte aufstellen lassen; die Schwere wird dabei ausser Betracht fallen. Dagegen müssen die rückwärts gerichteten Componenten der Widerstände als schädliche von den vorwärts gerichteten als nützlichen scharf auseinander gehalten werden. Erstere übernehmen gleichsam mit Bezug auf die horizontale Locomotion die Rolle des zu bekämpfenden Einflusses, den bei der verticalen Locomotion die Schwere spielt. Da diese Einflüsse von Moment zu Moment wechseln, so wird dadurch die Aufgabe etwas complicirter; immerhin aber gelingt ihre Lösung auf dem angedeuteten Wege, sobald die Form der Maschine und ihrer Bewegung und die äusseren horizontalen Widerstände bekannt sind.

Wir gehen aber auf dieses Problem einstweilen nicht weiter ein, wenden uns vielmehr einer ganz neuen Aufgabe zu.

γ. Die Einzelwirkungen der inneren Kräfte zwischen Rumpf und Flügel.

A. Allgemeines.

Es gilt zu ermitteln, an welchen Stellen des Apparates und in welcher Weise die inneren Kräfte entwickelt und wie weit dabei

die Muskeln in Anspruch genommen werden. Diese Fragen sind es ja, an deren Lösung uns am allermeisten gelegen ist.

Die beiden Flügel sind mit dem Rumpf durch Gelenke verbunden, welche im Wesentlichen nur eine drehende Bewegung der Flügel gegenüber dem Rumpfe gestatten, allerdings eine Drehung in jeder beliebigen Richtung. Annähernd ein und derselbe Punkt des proximalen Humerus-Endes bleibt dabei stets in derselben Lage gegenüber dem Rumpf, so dass man fürs erste ohne grossen Fehler annehmen kann, der Flügel sei um diesen einen Punkt, der nahe aussen an der Pfanne des Schultergelenkes gelegen ist, in jeder beliebigen Richtung drehbar. Für jeden kleinsten Moment der Drehung ändert dann, wie sich leicht beweisen lässt, nicht bloss der eine materielle Punkt des Flügels, der mit dem Drehungsmittelpunkt zusammenfällt, seine Lage zum Rumpfe nicht, sondern dasselbe gilt für eine ganze gradlinige Reihe von Punkten, welche in einer bestimmten, durch den Drehungsmittelpunkt gehenden geraden Linie liegen (instantane Drehungsaxe). Die instantane Axe kann freilich von Moment zu Moment ihre Lage zum Rumpf und zum Flügel ändern.

Es handelt sich also um das sehr schwierige Problem der Bewegung zweier in einem einzigen Punkte drehbar verbundener starrer Partialmassen; es gilt, aus den vorhandenen Kräften die davon abhängige Beschleunigung der verschiedensten Theile des Systems beurtheilen zu lernen, oder aus der bekannten Bewegungsänderung auf die dabei betheiligten Kräfte zu schliessen. Eine solche Disposition des Apparates kehrt bei den verschiedensten Formen der thierischen Locomotion wieder, so dass die Behandlung der vorliegenden Aufgabe von allgemeinerem Interesse sein dürfte.

1. Aeussere Kräfte am Flügel.

Durch irgend eine äussere Kraft k am Flügel, welche hinsichtlich ihrer Grösse, der Richtungslinie und des Sinnes ihrer Einwirkung bekannt ist, und durch den Drehpunkt o des Flügels lässt sich eine Ebene legen, welche als Kraftebene von k oder mit ok bezeichnet werden kann. Diese Kraftebene braucht im Allgemeinen nicht den Schwerpunkt d des Flügels zu treffen. Die gerade Verbindungslinie des Drehpunktes mit dem Schwerpunkt s werde als Hebelarm der Schwere, sie und ihre Verlängerung werde als Längslinie des Flügels bezeichnet. Durch die Längslinie lässt

sich im Allgemeinen eine einzige Ebene senkrecht zur Kraftebene legen. ($oes\varepsilon\ \mu mo$ unserer Figur 18).

Man kann sich nun den Angriffspunkt der Kraft k in ihrer eigenen Richtung bis in die Schnittlinie der Kraftebene mit der zu ihr senkrechten Längsebene des Flügels verlegt denken, bis in den Punkt m unserer Figur, und weiterhin die Kraft k nach der Richtung dieser Schnittlinie om und der zu ihr senkrecht stehenden Richtung der Kraftebene rechtwinklig zerlegt denken. Die Richtung der ersten Componente (jene Schnittlinie) kann als Seitenlinie eines um die Längsaxe des Flügels durch die Linie om gelegten Kegelmantels betrachtet werden, die zweite Componente liegt in der durch m gelegten Basisfläche des Kegels, welche die Längslinie im Punkte e trifft und steht nicht bloss zu mo, sondern auch zu me senkrecht, tangirt also die kreisförmige Basis im Punkte m; me stellt die kürzeste Entfernung der Kraftrichtung k von der Längslinie des Flügels dar.

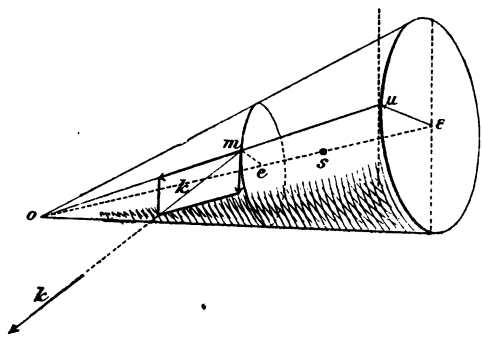


Fig. 18.

Die erstgenannte Componente von k soll als o-Radialcomponente k_{or}, die zweite als m-Tangentialcomponente k_{mtg} bezeichnet werden.

Man denke sich nun die Kegelfläche durch om um die Flügellängslinie fortgesetzt bis zu einer zweiten Ebene, welche senkrecht zur Flügellängslinie durch einen bestimmten Punkt ε, dessen Bedeutung bald genauer definirt werden soll, verläuft. Letztgenannte Ebene soll als die ε Tangentenebene bezeichnet werden, weil sie die um o durch den Punkt ε gelegte Kugelfläche in ε tangirt.

Die Verlängerung der Seitenlinie om des Kegels trifft diese zweite Basisfläche im Punkte μ. Man kann nun die Componente k_{mtg} ersetzen durch zwei parallele Kräfte in o und in μ, die man

als o-Seitenkraft und μ-Tangentialcomponente von k oder mit k_{os} und $k_{\mu tg}$ bezeichnen kann.

$k_{\mu tg}$ wirkt dann in der Schnittlinie der Kraftebene von k mit der ε Tangentenebene, und der Punkt μ ist derjenige Punkt dieser Kraftrichtung, welcher ε zunächst liegt.

Es ist dann: $k_{os} + k_{\mu tg} = k_{mtg}$. 1)

und $k_{mtg} \cdot \overline{om} = k_{\mu tg} \cdot \overline{o\mu}$

oder $k_{mtg} \cdot \overline{oe} = k_{\mu tg} \cdot \overline{o\varepsilon}$ } 2)

Endlich ändert man an den Verhältnissen nichts, indem man im Punkte ε parallel der Kraftrichtung $k_{\mu tg}$, oder also parallel k_{mtg} und senkrecht zu $\overline{o\varepsilon}$ 2 Kräfte hinzugefügt, von denen eine nach Grösse und Sinn der Einwirkung $= k_{\mu tg}$, die andre $= -k_{\mu tg}$ ist.

1) Letztere stellt zusammen mit $k_{\mu tg}$ in μ eine Drehkraft dar, welche den Flügel um seine Längsaxe mit dem Moment $k_{\mu tg} \cdot \overline{\mu\varepsilon} = k_{mtg} \cdot \overline{me}$ zu drehen strebt. Die daneben noch übrig bleibenden Wirkungen der Kraft k sind

2) eine Componente in ε parallel der Kraftebene und senkrecht zur Flügellängslinie. Nach Grösse, Richtung und Sinn der Einwirkung ist diese Componente

$$k_\varepsilon = k_{\mu tg} = k_{mtg} \cdot \frac{\overline{oe}}{\overline{o\varepsilon}} = k_{mtg} \cdot \frac{l}{\lambda} \quad \text{wenn } \overline{oe} = l \text{ und } \overline{o\varepsilon} = \lambda$$

3) die o. Seitenkraft $k_{os} = k_{mtg} \frac{\overline{o\varepsilon}}{\overline{e\varepsilon}} = k_{mtg} \frac{\lambda - l}{\lambda}$

4) die o-Radialcomponente von $k = k_{or}$.

Man hätte zu demselben Resultate auch gelangen können, wenn man zu der Componente k_{or} und k_{mtg} zwei Kräfte parallel k_{mtg} im Punkte e hinzugefügt hätte, die eine $= -k_{mtg}$, welche mit k_{mtg} in m eine Drehkraft darstellt, welche den Flügel um seine Längslinie dreht, und eine zweite Kraft $= k_{mtg}$ in e, welche senkrecht zur Flügellängslinie wirkt. Wirklich lässt sich diese letztereKraft in e durch zwei parallele Kräfte in o und e ersetzen, welche $= k_{os}$ und $= k_{\mu tg}$ sind.

Man ist vielfach der Meinung, dass eine Kraft, welche senkrecht zur Längslinie eines Hebelarmes wirkt, nur dazu dient, den Hebelarm um sein Hypomochlion, sagen wir um einen bestimmten Drehpunkt o zu drehen, auf den Drehpunkt selbst, aber auf das Achsenlager in keiner Weise einwirke. Diese Annahme aber ist im Allgemeinen eine irrige.

Es giebt nur einen einzigen Punkt in der Längslinie des

Flügels, an dem eine gleichgerichtete Kraft einwirken kann, ohne dem Punkte o für die erste kurze Zeit der Wirkung eine Beschleunigung zu ertheilen. Dieser Punkt ε ist jedenfalls distal vom Schwerpunkt gelegen ist. Eine nicht gegen den Schwerpunkt gerichtete Kraft ertheilt nämlich einmal dem Schwerpunkt eine Beschleunigung, als ob sie in gleicher Grösse und Richtung auf die in ihm concentrirt gedachte Masse einwirkte, ausserdem aber ertheilt sie dem Ganzen eine bestimmte Drehbeschleunigung um den Schwerpunkt. Eine Kraft muss also senkrecht gegen die Längslinie des Flügels gerichtet sein und in ganz bestimmter Entfernung distal vom Schwerpunkt angreifen, damit in einer bestimmten sehr kurzen Zeit der Punkt o des Flügels in Folge der translatorischen Verschiebung des Ganzen mit dem Schwerpunkte gerade um so viel in der Richtung der Kraft beschleunigt werde, als durch die Drehung um den Schwerpunkt in der entgegengesetzten Richtung. Und zwar ist die Lage dieses Punktes ε in der Längslinie des Flügels im Allgemeinen für die verschiedenen Kräfte, welche um verschiedene senkrecht zur Flügellängslinie gerichtete Axen zu drehen streben, eine verschiedene.

Sie berechnet sich für irgend eine senkrecht zur Flügellängslinie wirkende Kraft k folgendermassen. (Fig. 19).

M sei die Masse des Flügels, s der Schwerpunkt, os der Schwerpunktshalbmesser $= l$, die Bildfläche der Fig. 19 entspreche der Kraftebene, so dass die Drehung, welche die Kraft k dem Flügel an sich ertheilen würde, wenn er vollständig frei wäre, um eine Schwerpunktsaxe stattfinden müsste, welche senkrecht zur Bildfläche durch den Punkt s geht; der Trägheitshalbmesser für diese Drehung parallel der Bildfläche um den Punkt s sei $= R$, das zugehörige Trägheitsmoment $= MR_2$, so ist das Trägheitsmoment für die Drehung parallel der Bildfläche um den Punkt $o = M \cdot R^2 + M \cdot l^2 = M\,(R + l^2)$.

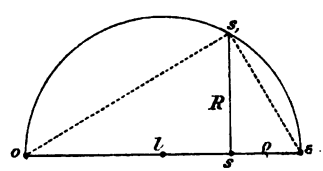


Fig. 19.

Wenn der Punkt ε, in welchem die Kraft k angreift, wirklich den oben aufgestellten Postulaten genügen soll, und wenn der Abstand des Punktes ε von s mit ϱ bezeichnet wird, so muss $\frac{k}{M}$, d. h. die Bewegung des Punktes o mit dem Schwerpunkt,

$= \frac{k \cdot \varrho}{MR^2} \cdot l$ sein, d. h. gleich der umgekehrt gerichteten Bewegung von o in Folge der Drehung des Flügels um den Schwerpunkt, oder $\frac{k}{M} = \frac{k \cdot \varrho \cdot l}{M \cdot R^2}$; es muss also $\varrho \cdot l = R^2$ sein.

Wenn man also in der Bildfläche in s senkrecht zu os den Trägheitshalbmesser für die in Rede stehende Drehung um s errichtet, so liegt der Gipfelpunkt s^1 dieses Trägheitshalbmessers mit o und ε in demselben Halbkreis über $o\varepsilon$.

Dieser Punkt ε stimmt, wenn ich nicht irre, mit dem überein, was man in der Mechanik als Percussionscentrum bezeichnet. Wir dürfen ohne grossen Fehler annehmen, dass dieser Punkt ε für ein und dieselbe, z. B. die maximal ausgespannte Form des Flügels dieselbe Lage in der Flügellängslinie habe, möge die Längsebene, in welcher die Kraft k wirkt, so oder anders, parallel der Flügelfläche oder senkrecht oder schräg zu derselben gerichtet sein. Mit der Einziehung des Flügels ändert sich natürlich die Entfernung ϱ des Punktes ε von s und die Entfernung vom Drehpunkt o; letztere soll in Zukunft mit λ bezeichnet werden ($\lambda = l + \varrho$).

Nach dem soeben Erörterten wird man den Zweck der oben von uns angegebenen Zerlegung der äusseren Kraft k verstehen.

Zusammenfassung.

Man bestimmt die 2 Punkte m und e der Kraftrichtung und der Flügellängslinie, welche den geringsten Abstand von einander haben, verlegt den Angriffspunkt der Kraft k nach m und zerlegt sie nach der Richtung mo und der dazu senkrecht stehenden der Kraftebene in die Componenten k_{or} und k_{mtg}.

k_{mtg} wird ersetzt durch 2 parallele Kräfte in o und in der Schnittlinie der Kraftebene mit der ε Tangentenebene, also durch k_{os} und $k_{\mu tg}$.

$k_{\mu tg}$ wird ersetzt:

1) durch ein Kräftepaar in einer zur Flügellängslinie senkrecht gerichteten, also der ε-Tangentenebene parallelen Ebene, welche die Bewegung der Punkte der Flügellängslinie nicht ändert und dessen Moment $= k_{\mu tg} \cdot \mu\varepsilon = k_{mtg} \cdot me$ ist.

2) durch eine Kraft k_ε parallel der Schnittlinie der Kraftebene $_ok$ mit der ε-Tangentenebene, gleich gross und gleichgerichtet wie $k_{\mu tg}$, oder $= k_{mtg} \frac{\overline{oe}}{\overline{o\varepsilon}}$

Diese Kraft dreht den Flügel parallel der durch ihre Richtung und den Punkt o gelegten Ebene um o, ohne den Bewegungszustand von o zu ändern, mit dem Moment $k_{mtg} \cdot \overline{oe}$.

Wirken von Seite des Rumpfes auf den Flügel durch den Gelenkpunkt o Kräfte ein, welche gerade 1) der o-Radialkraft k_{or} 2) der o-Seitenkraft $k_{os} = k_{mtg} \cdot \frac{\overline{oe}}{\overline{e\varepsilon}}$ das Gleichgewicht halten, so erfährt der Punkt o durchaus keine Beschleunigung; die ganze Beschleunigung des Flügels hängt nur ab von $k_{\mu tg}$ in μ, die Beschleunigung des Flügelschwerpunktes aber einzig und allein von der Componente k_ε. Sie ist dann so gross, als ob die Kraft k_ε direkt in gleicher Grösse und Richtung auf die im Flügelschwerpunkt s concentrirt gedachte Flügelmasse einwirkte.

Es sei noch bemerkt, dass die o-Seitenkraft k_{os} gleichgerichtet ist wie k_{mtg}, wenn e zwischen o und ε liegt, umgekehrt gerichtet, wenn e distal von ε liegt, und dass sie in beiden Fällen kleiner ist als k_{mtg}. $k_{\mu tg}$ dagegen ist ebenfalls kleiner als k_{mtg} im ersten Falle, grösser im zweiten, unter allen Umständen aber wirkt diese Componente im gleichen Sinne wie k_{mtg}.

In Zukunft werden wir der Vereinfachung halber folgende Bezeichnungen anwenden.

Die Drehbewegung des Flügels um die Flügellängslinie soll als Längsrollung oder Rotatio (in analogem Sinn ist das Wort nun einmal in der menschlichen Anatomie gebräuchlich) bezeichnet werden, ferner die quer zur Flügellängslinie durch o gehenden Axen als o-Transversalaxen des Flügels, die Drehung des Flügels um irgend eine solche Axe als eine Radiusbewegung.

2. Wirkung der inneren Kräfte, welche entfernt von o liegen.

Bei der Zerlegung der Wirkung innerer Knäfte handelt es sich ebenfalls darum, zu ermitteln, wie gross die reine Beschleunigung des Flügelschwerpunktes ist, und wie gross derjenige Theil der am Flügel wirkenden Kraft, dem in o vom Rumpfe aus kann Gleichgewicht gehalten werden. Wir bezeichnen die Wirkung dieser inneren Kraft auf den Flügel mit p, diejenige auf den Rumpf der Kraft mit $-p$. Im Uebrigen wählen wir dieselbe Art der Zerlegung und dieselben Ortsbezeichnungen wie vorhin, verlegen also p bis in den Punkt m der Linie, in welcher die Kraftebene

und die senkrecht dazu gerichtete Schwerpunktsebene sich schneiden, nehmen also an, der Punkt m sei ein starr mit dem Flügel verbundener Punkt des Raumes.

Wir wollen uns ferner denken, mit diesem Punkte m falle ein dem Rumpf zugehöriger, mit diesem starr verbundener Punkt zusammen, und es sei auf letzteren unter Beibehaltung der Richtungslinie, auch den Angriff der Rumpfkraft $— p$ verlegt. Im Punkte m werden also gleichsam 2 zusammenfallende Punkte von Rumpf und Flügel durch eine innere Kraft in der Richtung p und $— p$ auseinander getrieben.

Man zerlege wieder die Wirkung nach der Richtung mo und der dazu senkrechten Richtung der inneren Kraftebene. Man bekommt eine Componente p_{or} der innern Kraft am Flügel und eine entgegengesetzt gerichtete gleich grosse Componente der innern Kraft am Rumpfe $— p_{or}$. Beide wirken in derselben Linie om durch den Gelenkpunkt und heben sich also an der Gelenkverbindung gegenseitig auf, d. h. sie drücken Rumpf und Flügel am Gelenk gegeneinander oder ziehen sie auseinander, bis die dadurch wachgerufenen, ebenfalls in der Richtung om wirkenden Widerstände an dem Gelenk ihnen wechselseitig das Gleichgewicht halten. Dabei kommt keine merkliche Bewegung zu Stande.

Man bekommt zweitens bei dieser Zerlegung eine Componente p_{mtg}, und eine Gegenkraft $— p_{mtg}$ die man wieder je durch 2, durch o und μ gerichtete Parallelkräfte ersetzt.

Die beiden Componenten durch o, p_{os} und die entsprechende Gegenkraft heben sich wieder gegenseitig auf unter Wachrufung neuer passiver Winderstandskräfte der Gelenkverbindung. Es bleibt noch die Kraft $p_{\mu tg}$ $\left(= p_{mtg} \cdot \frac{\overline{oe}}{\overline{o\varepsilon}} \right)$ und ihre Gegenkraft, welche in der Linie wirken, in welcher sich die Kraftebene mit der durch ε senkrecht zur Flügellängslinie gelegten Ebene (oder mit der sog. ε-Tangentenebene, welche die durch ε um o gelegte Kugelfläche in ε tangirt) schneidet; die Wirkung von $p_{\mu tg}$ auf den Flügel ist dann:

1) eine Drehungswirkung um die Längslinie, deren Moment

$$= p_{\mu tg} \cdot \mu\varepsilon = p_{mtg} \cdot \overline{me}$$

2) eine Drehungseinwirkung, entsprechend einer Kraft $p\varepsilon$, welche parallel zu p_{mtg} und mit gleicher Grösse auf ε einwirkt.

Das Moment dieser Drehung $= p_{mtg} \cdot \overline{oe}$.

Zu diesen Einwirkungen auf den Flügel, durch welche der Bewegungszustand von o nicht beeinflusst wird, gehört dann also eine Gegenwirkung auf den Rumpf $= - p_{\mu tg}$ in der Schnittlinie der Kraftebene mit der ε-Tangentenebene. Diese Kraft an sich würde natürlich im Allgemeinen vom Rumpfe aus den Bewegungszustand von o beeinflussen.

3. Innere Kräfte, welche durch den Drehpunkt o wirken (Gelenkaxenkräfte).

a) Solche Kräfte werden erstens passiv durch die Wirkung der inneren Gelenkdrehkräfte wachgerufen, sofern die Richtung der letzteren nicht mit der ε Tangentenebene zusammenfällt. Sie halten den durch o wirkenden Componenten dieser Kräfte das Gleichgewicht s. o. Sie können mit diesen zusammen vernachlässigt werden. Höchstens kommt in Betracht, dass der Druck der Gelenkflächen gegeneinander und damit die Reibung um so grösser wird, je kleiner die Entfernung der inneren Kraftrichtung vom Drehpunkt o im Vergleich zum Abstand $o\varepsilon$ ist.

Diese inneren Gelenkaxenkräfte sammt den sie hervorrufenden Componenten der inneren Gelenkdrehkräfte gehen also sowohl für die Beschleunigung des Rumpfes als auch für diejenige des Flügels verloren.

b) Die äusseren Kräfte am Flügel lassen sich jeweilen ersetzen durch eine Kraft, welche dem Flügel eine Drehbewegung um eine o Axe ertheilt, den Punkt o also nicht beeinflusst ($k\varepsilon$ und die Drehkraft um die Flügellängslinie) und durch eine zweite Kraft (Resultirende von k_{or} und k_{os} s. o.), welche durch den Drehpunkt o wirkt. Wäre das Gelenkende des Flügels in dem betreffenden Moment in seiner Bewegung nicht gehemmt, so würde die letztgenannte Kraft auf den Punkt o und nach bestimmtem Gesetze auch auf die übrigen Theile des Flügels und also auch auf den Schwerpunkt desselben beschleunigend einwirken. Wirkt aber von Seite des Rumpfes eine Kraft auf den Flügel ein, welche bewirkt, dass trotz der äusseren Kraft k am Flügel der Punkt o seinen Bewegungszustand nicht ändert, so geht die ganze Gelenkaxencomponente k_o der äusseren Kraft k am Flügel für die Bewegung des letzteren verloren, indem eine solche Kraft vom Rumpf aus nothwendig mit derselben Grösse, in derselben Geraden durch o, aber im umgekehrten Sinne wie k_o wirken muss. Es handelt sich in Wirklichkeit dabei um einen Bewegungsaustausch von Theil-

chen zu Theilchen bis zum Punkte o und von da weiter von den Theilchen des Flügels zu denen des Rumpfes, vermittelt durch kleinste Lageveränderungen und dadurch wachgerufene elastische Kräfte [1]).

Wegen der Starrheit der Verbindungen aber geschieht der Austausch fast momentan und können die Verschiebungen an den Theilchen vernachlässigt werden, so dass man von einem Beschleunigungsaustausch sprechen kann. In der Richtungslinie ko zwischen Rumpf und Flügel wirkt also eine innere Gelenkaxenkraft und Gegenkraft. Damit der Wirkung einer vom Flügel zum Rumpf wirkenden Gelenkaxenkraft k_o vollständig Gleichgewicht gehalten werde, muss die Gegenkraft $= -k_o$ sein.

c) In Wirklichkeit nun ist im allgemeinen die Bewegungsänderung des Punktes o nicht $= 0$, vielmehr oscillirt der Punkt o periodisch sowohl in verticaler als in horizontal-sagittaler Richtung um eine mit gleichförmiger Geschwindigkeit im Raum horizontal vorwärts sich verschiebende Mittellage hin und her. Man muss also annehmen, dass ausser den oben genannten inneren Gelenkaxenkräften noch andere zwischen Rumpf und Flügel wirken, welche, so weit sie den Flügel treffen, gerade genügen, um die resultirende Bewegungsänderung des Punktes o und die damit nothwendig verbundene Bewegungsänderung der übrigen Theile des Flügels hervorzurufen. Wir bezeichnen diese Einwirkung in irgend einer bestimmten sehr kleinen Phase vorläufig mit Df, die zugehörige Gegenwirkung auf den Rumpf mit $-Df$.

d) Ausser den genannten 3 Categorien von inneren Gelenkaxenkräften muss aber in der Regel noch eine vierte berücksichtigt werden. Sind nämlich in dem ins Auge gefassten Zeittheilchen Rumpf und Flügel bereits in Bewegung gegeneinander begriffen, so kommt noch in Betracht, dass eine Umänderung der Richtung der von den Flügeltheilchen erworbenen relativen Geschwindigkeiten durch die Befestigung im Gelenk vor sich geht, welche nur durch innere Gelenkaxenkräfte in der Richtung der Längslinie der Flügels vermittelt werden kann. Es handelt sich also viertens um „Gegenwirkung gegen die Centrifugalkräfte des Flügels“ und um eine entsprechende Einwirkung der Centrifugalkräfte des Flügels auf den Rumpf. Wir bezeichnen die Wirkung

---

[1]) Vgl. H. Strasser, Ueber die Grundbedingungen der activen Locomotion. Halle 1880, pg. 20.

auf den Flügel mit Cf, die entsprechende Gegenwirkung auf den Rumpf mit $-Cf$.

4. Zusammenfassung.

Die bekannte resultirende Bewegungsänderung des Flügelschwerpunktes hängt also in irgend einer Phase nur von folgenden inneren und äusseren Kräften ab:

1) von den ε-Componenten der äusseren Kräfte am Flügel,
2) von den ε-Componenten der inneren Gelenkdrehkräfte,
3) von der Gegenkraft Cf gegen die Centrifugalwirkung, welche vom Flügel in Folge der bereits von ihm erworbenen relativen Bewegung gegenüber dem Rumpfe ausgeübt wird,
4) von der Kraft Df.

Und zwar ändert der Flügelschwerpunkt seine Bewegung so, als ob alle diese Kräfte direkt auf die in ihm concentrirt gedachte Flügelmasse einwirkten.

Die Bewegungsänderung des Rumpfschwerpunktes aber hängt nur ab:

1) von der Wirkung der äusseren Kräfte am Rumpf und von den o-Componenten der äusseren Kräfte am Flügel,
2) von den ε-Componenten der inneren Gelenkdrehkräfte,
3) von der Centrifugalwirkung des Flügels auf $o = -Cf$,
4) von der Kraft $-Df$, d. h. von der Bewegungseinbusse oder Beschleunigung, welche der Rumpf erfährt, indem er das an sich gleichförmig bewegte Rumpfende des Flügels mit sich nimmt.

Um die Bedeutung dieser Ableitung ins rechte Licht zu setzen, sei schon jetzt darauf hingewiesen, dass die resultirende Bewegung des Rumpf- und Flügelschwerpunktes und dass No. 1, 3 und 4 der auf den Rumpfschwerpunkt wirkenden Kräfte genau bestimmt werden können, wenn die Configuration der Maschine und die Form der Bewegung bekannt sind; es müssen also auch No. 2, die ε-Componenten der inneren Gelenkdrehkräfte ermittelt werden können. Diese inneren Gelenkdrehkräfte aber sind, wie später noch genauer dargethan werden soll, wesentlich nur Muskelspannungen.

Diese Andeutung wird genügen, um den bis jetzt von uns eingehaltenen Weg der Analyse zu rechtfertigen. Im Folgenden sollen nun zunächst die Einwirkungen 1), 3) und 4) eingehend untersucht werden. Dann erst werden Grösse und Richtung der ε-Com-

ponenten der nothwendigen inneren Gelenkdrehkräfte beurtheilt werden können.

B. Specielles.

1. Die Wirkung des Flügelgewichtes.

Es sei daran erinnert, dass R das Gewicht des Rumpfes, F dasjenige der beiden Flügel bedeutet, die man als die beiden Hälften eines Doppelflügels auffassen kann. Die quere Bewegung des letzteren ist ebenso wie diejenige des Rumpfes jederzeit in Summa $= 0$.

Man kann sich nun aber, wie schon angedeutet wurde, die materiellen Punkte der einen Körperhälfte mit den correspondirenden Punkten der andern vereinigt denken und annehmen, dass die Bewegung dieser einen Hälfte wie zuvor erfolgt, indem nicht bloss alle Massen, sondern auch alle inneren und äusseren Kräfte an derselben verdoppelt sind. Im Folgenden soll mit l der Abstand des Schwerpunktes s des Flügels von o bezeichnet werden.

Man kann F sofort nach o und ε zerlegen. Die Theilkraft, die in o senkrecht abwärts wirkt, ist $F. \frac{\lambda - l}{\lambda}$; die verticale Kraft in $\varepsilon = F. \frac{l}{\lambda}$. Diese letztere muss nun wieder in der Kraftebene der Schwere zerlegt werden in eine o Radialkraft und in eine ε Tangentialkraft.

Letztere repräsentirt die ganze Wirkung des Flügelgewichtes zur Bewegung des Flügels ohne Beeinflussung von o.

$F_{tg} = F. \frac{l}{\lambda}. \sin \alpha$, wobei α den Winkel bedeutet, welchen die Flügellängslinie mit der Verticalen macht. Die o-Radialcomponente aber $= F. \frac{l}{\lambda} \cos \alpha$.

Die ganze Wirkung von F auf o ist also die Resultirende der beiden Wirkungen $F. \frac{\lambda - l}{\lambda}$ in verticaler Richtung abwärts und $F \frac{l}{\lambda}. \cos \alpha$ in der Richtung der Flügellängslinie abwärts.

Der erste Theil der Wirkung stellt einen constanten Betrag dar, der letzte einen wechselnden; es empfiehlt sich den letzteren zunächst in der Schwere-Kraftebene nach der verticalen und der horizontalen Richtung zu zerlegen. Die verticale Componente $= F \frac{l}{\lambda}. \cos^2 \alpha$. (immer abwärts gerichtet). Demnach ist die ge-

sammte verticale Wirkung des Flügelgewichtes durch o, also die Kraft $F_{o.v} = F.\frac{\lambda - l}{\lambda} + F.\frac{l}{\lambda}\cos^2\alpha$.

Die horizontale Componente von $F\frac{l}{\lambda}\cos\alpha$ ist $F\frac{l}{\lambda}\cos\alpha\sin\alpha$, zerlegt sich nach der z und q Richtung der Horizontalebene. Die q-Componente braucht nicht weiter berücksichtigt zu werden.

Die z-Componente $F_{oz} = F.\frac{l}{\lambda}\cos\alpha.\sin\alpha\cos b$, wobei b den Winkel bedeutet, welchen die Horizontalebenenprojection der Flügellängslinie mit der z-Axe, oder die Kraftebene der Schwere mit der $z\,v$-Ebene (vorn an ersterer, aussen an letzterer) bildet. Diese Wirkung ist rückwärts gerichtet, wenn sowohl α als $b < 90^0$ sind.

F_{ov} besteht aus dem constanten Betrag $F\frac{\lambda - l}{\lambda}$, der etwa $\frac{1}{3}$ des ganzen Flügelgewichtes beträgt [1]), und einem mit $\cos^2\alpha$ wechselnden Betrag, der sehr klein wird, wenn die Flügellängslinie sich der Horizontalebene nähert. Der Schwerpunkt des Flügels liegt ungefähr an der Grenze des inneren und mittleren Drittels der Flügellänge, der Punkt ε liegt etwa an der Grenze des mittleren und äusseren Drittels, bis gegen die Mitte der Länge des Flügels hin. Ist die Horizontalebene erreicht, so ist $\alpha = 90^0$, und das ganze zweite Glied von F_{ov} verschwindet. F_{oz} ist wegen α am grössten bei mittlerer Hebung oder Senkung der Flügellängslinie, wird aber unter allen Umständen sehr klein und zuletzt $= 0$, wenn die letztere sich der qv Ebene nähert. Diese Wirkung kann ohne grossen Fehler vernachlässigt werden.

2. Die auf den Flügel wirkenden Widerstände.

Sie lassen sich nach Prechtl durch eine Resultirende ersetzen, welche in einem ganz bestimmten Punkte des Flügels ein für alle mal gelegen ist, vorausgesetzt, dass die Form des Flügels sich nicht ändert. Und jener Autor hat genau angegeben, wie die Lage dieses Punktes für die verschiedensten Flügelformen zu bestimmen ist (pg. 136 u. ff.).

Müllenhoff [2]) bemerkt mit Bezug auf die Prechtl'schen

[1]) Prechtl, Untersuchungen über den Flug der Vögel. 1847 pg. 220.

[2]) Müllenhoff, Die Grösse der Flugflächen. Bonn 1884. Sep.-Abdr. aus Pflügers Arch. d. ges. Physiol. Bd. XXXV. pg. 421.

Berechnungen: „nimmt man den Luftwiderstand proportional der zweiten Potenz der Geschwindigkeit, so wäre er zu berechnen nach der Formel $\int yx^3\,dx / \int yx^2\,dx = h$ und nicht nach der Formel $\int yx^3\,dx = h^3 f$, wie sie PRECHTL angiebt .... Es würde hiernach die Lage des Druckmittelpunktes bei einem sich verschmälernden Dreieck auf 0,6, bei einem sich verbreiternden Dreieck auf 0,8, bei einem Rechteck auf 0,75 der Länge fallen". Diese Einwendung von MÜLLENHOFF ist vollständig gerechtfertigt. Die PRECHTL'sche Formel ist nur zulässig, wenn man den Widerstandspunkt anders definirt, nämlich als den Punkt, dessen Geschwindigkeit senkrecht zur Fläche des Flügels sämmtliche Theile des Flügels in irgend einem Momente haben müssten, damit bei derart paralleler und gleicher Bewegung aller Punkte gegen die Luft derselbe Widerstand hervorgerufen werde, den der Flügel thatsächlich in diesem Augenblick erzeugt (Punkt des Flügels, in welchem man sich gleichsam die ganze Flügelfläche concentrirt denken kann).

So viel ich sehe, war eine derartige Vereinfachung der Verhältnisse wirklich das von PRECHTL [1]) Erstrebte, es ist also nur seine Definition vom Widerstandspunkt (§ 146) falsch.

Für unsere Zwecke aber kommt es darauf an, die wirkliche Resultirende des Widerstandes nach Grösse, Richtung und Ort des Angriffs zu kennen; wir müssen uns also der von MÜLLENHOFF angegebenen Formel und der von ihm daraus berechneten Angaben bedienen, wenn wir die von PRECHTL und MÜLLENHOFF dabei gemachte Voraussetzung als richtig anerkennen, dass der Widerstand zunächst dem Drehpunkt $o = 0$ ist und von da aus gegen die Spitze des Flügels hin pro Flächenelement proportional dem Quadrat der Entfernung von der Drehungsaxe wächst.

Wir brauchten dann nur ein für alle mal die Lage dieses Druckmittelpunktes zum Punkte ε zu ermitteln, um das Gesetz der Vertheilung des Widerstandes nach o und ε zu finden. Eine solche Voraussetzung wäre nun, da der Flügel sich nicht nur um sein Schulterende dreht, sondern zugleich mit dem Rumpf bewegt, nur zulässig, wenn die Sagittalprofile immer genau horizontal gerichtet wären, und wenn die Schulter keine verticalen Schwankungen ausführte. Es kann vorkommen, dass letztere wirklich vernachlässigt werden dürfen. Die erste Voraussetzung aber ist niemals auch nur annähernd zutreffend.

Wir haben vielmehr einsehen gelernt, dass an der Basis des

[1]) Und ebenso von REICHEL und LEGAL in ihrer Arbeit s. u.

Flügels zumeist, wegen ihrer Supination, ein auf- und rückwärts gerichteter Widerstand entwickelt wird, der allerdings periodisch zu- und abnimmt. Der Widerstand an den äusseren Theilen des Flügels aber hängt wegen der Pronation dieser Theile ebenfalls nicht bloss von der Drehung um die Schulter, sondern von der absoluten Bewegung gegen die Luft, also auch von der Bewegung des Flügels mit dem Rumpfe ab.

Mit einem Worte, der Widerstand am Flügel darf nicht bloss als eine Funktion der relativen Bewegung zum Rumpfe betrachtet werden; er ist eine Function der complicirteren absoluten Bewegung seiner verschiedenen Flächentheile gegen die Luft.

In Folge dessen müssen wir darauf verzichten, allgemein gültige Formeln für die Berechnung des Flügelwiderstandes aufzustellen, oder die mühevollen und scharfsinnigen Aufstellungen von Prechtl über den Luftwiderstand am Flügel weiterhin zu verwerthen. Im concreten Fall ist natürlich eine Berechnung der Widerstände möglich, wenn die Form der Bewegung genau bekannt ist.

Die eine Frage aber ist zum voraus zu untersuchen, ob wirklich der ganze Widerstand am Flügel beschleunigend auf letzteren einwirkt, ohne den Punkt *o* zu beeinflussen, ob nicht vielmehr ein Theil desselben direkt durch den Punkt *o* wirkt und sich auf den Rumpf fortpflanzt. Da sind vor allem die *or* Componenten der an den einzelnen Flächenstücken entwickelten Widerstände ins Auge zu fassen. Diese brauchen durchaus nicht überall $= 0$ zu sein. Wo irgendwo der distale Theil einer Flügelebene gegenüber dem proximalen nach der Dorsal- oder Ventralseite des Flügels hin abweicht, hat der Widerstand eine *or* Componente. Nun ist es wohl bekannt, wie vielfach das Ende des Flügels ventralwärts gekrümmt ist (s. pg. 77) und wie es sich in andern Fällen, z. B. bei Krähen, am Ende des Niederschlages dorsalwärts aufbiegt. Auch sind die Flächen der einzelnen Schwungfedern häufig so orientirt, dass nicht bloss vordere Punkte derselben gegenüber den direkt hinter ihnen gelegenen, sondern auch distale gegenüber den direkt proximal davon liegenden mehr gegen die Ventralseite des ganzen Flügels vorgeschoben sind.

Die *or* Componenten gehen zwar für die Drehung des Flügels um *o* verloren, können aber doch vortheilhaft locomotorisch wirken beim gehobenen vorgeführten Flügel, wenn sie unten an Flächen wirken, die mit dem distalen Rande stärker ventralwärts abgelenkt sind, beim zurückgestellten gesenkten Flügel, wenn sie

von unten her auf distalerseits dorsalwärts abgelenkte Flächen wirken. Auch können solche Componenten mithelfen, um die Form des Flügels in nützlicher Weise zu beeinflussen, z. B. die Schwinge auszustrecken oder ausgestreckt zu erhalten.

Ist der Einfluss dieser Kräfte berücksichtigt, so handelt es sich daneben nur noch um tangentiale Componenten der Widerstandskräfte. Die Kräfte in *o* und *ε*, durch welche ihre Wirkung auf Rumpf und Flügelschwerpunkt ersetzt werden kann, sind dann senkrecht zur Flügellängslinie gerichtet. Sämmtliche *q*-Componenten der *o*-Kräfte gehen wegen der Symmetrie des Apparates für die Bewegung verloren. Die *q*-Componenten in *ε* dagegen entsprechen gerade demjenigen Bestandtheil der resultirenden *ε*-Tangentialcomponente des Flügelwiderstandes oder der resultirenden Wirkung desselben auf den Flügelschwerpunkt, der auf die verticale oder horizontale Beschleunigung des Flügel- (und Rumpf-)schwerpunktes keinen Einfluss hat.

Um zu beurtheilen, in wie weit der Widerstand am Flügel in locomotorisch nützlicher Richtung auf den Flügel und wie weit durch *o* auf den Rumpf einwirkt, braucht man also — abgesehen von den *or*-Kräften — nur die *z*- und *v*-Componenten der tangentialen Theile der Flügelwiderstände zu berücksichtigen. (Wir haben bei der Beurtheilung der Flügelwiderstände ihren Einfluss zur Drehung des Flügels um die Längsaxe ausser Acht gelassen. Darüber Näheres weiter unten S. 151).

In der ersten Hälfte der Flügelhebung ist unserer Ansicht nach an der Spitze des Flügels die verticale Componente des Widerstandes abwärts gerichtet, an der Flügelbasis aufwärts. Die entsprechende Componente in *ε* ist deshalb klein, wohl aber wirkt in *o* eine erhebliche verticale Componente nach oben. Dann folgt eine Phase, in welcher die Verticalcomponenten an Flügelbasis und Flügelspitze verhältnissmässig gleich stark aufwärts wirken, wo also die Resultirende ungefähr in der Mitte der Flügellänge proximal von *ε* angreift und immer noch eine Theilkraft, die im Punkt *o* nach oben wirkt, enthält neben der Theilkraft die nach *ε* entfällt.

Vielleicht wird gegen die Mitte des Niederschlages die Vertical-Componente an der Basis klein, an der Spitze sehr gross, und es nähert sich der Angriffspunkt der Resultirenden dem Müllenhoff'schen Druckpunkt, indem der Widerstand annähernd proportional dem Quadrat der Entfernung von *o* pro Flächenele-

ment sich verhält. Gegen den Schluss des Niederschlages und der Rückführung des Flügels rückt jedenfalls der Angriffspunkt der verticalen Resultirenden wieder proximalwärts.

Nun liegt unser Punkt ε sicher einwärts von dem MÜLLENHOFF'schen Druckpunkt, also von der Grenze des mittleren und äusseren Drittels der Flügellänge bis gegen die Mitte der Flügellänge hin, so dass die genannten Resultirenden des Flügelwiderstandes vielleicht im Mittel mit ε zusammenfallen, zu Anfang der Hebung proximal, beim Niederschlag eine Weile distal von ihm angreifen.

Wir können also die ablenkenden und die Verticalebenen-Einwirkungen, welche der Luftwiderstand am Flügel durch das Gelenkende auf den Rumpf ausübt, höchstens im Mittel $= 0$ setzen. Wollen wir genauer sein, so müssen wir berücksichtigen, dass wahrscheinlich zu Ende des Flügelniederschlages und im Beginn der Hebung der Luftwiderstand derartig drehend auf den Flügel einwirkt, dass dadurch das Gelenkende und durch dieses der Rumpf abwärts gedrückt wird, dass aber am Ende der Hebung und im Anfang des Niederschlages umgekehrt eine Wirkung nach oben von dem Gelenkende des Flügels aus auf den Rumpf stattfindet. Diese Schwankungen werden nach Zeit und Grösse etwas verschieden sein, je nach den besonderen Verhältnissen des einzelnen Falles.

Was aber die z-Componenten der Widerstände betrifft, so wirken dieselben an der Basis des Flügels fast immer in grösserem oder geringerem Maasse nach hinten, desgleichen an der Flügelspitze bei dem Ende der Hebung und dem Beginn des Niederschlages, dagegen vorwärts in der zweiten Hälfte des Niederschlages, bei der Rückführung und in geringem Masse wahrscheinlich im Beginn der Hebung. Kaum jemals nimmt der vorwärts ablenkende Widerstand nach aussen proportional dem Quadrate des Abstandes der Flächenelemente von o zu, sondern weniger, ja er vermindert sich im Gegentheil unter Umständen nach aussen und wird negativ. In allen diesen Fällen entfällt eine erhebliche Theilkraft dieser Widerstände, nach vorn wirkend, auf o.

3. Der Widerstand gegenüber den Centrifugalkräften am Flügel. (*Cf*).

Die relative Bewegung des Flügels zum Rumpf kann in jedem Augenblick zerlegt werden in eine Drehung um die durch o und

den Flügelschwerpunkt gelegte Schwerpunktsaxe, welche eine sog. freie Axe darstellt, und zweitens in eine Drehbewegung um eine quer zur Längslinie des Flügels gerichtete Axe des Punktes *o*. Nur die letztgenannte Drehung erfordert Kräfte des Rumpfes, welche den Punkt *o* des Flügels festhalten. Wir können ohne grossen Fehler annehmen, dass sämmtliche Centrifugalkräfte sich zu einer Resultirenden vereinigen, welche in der Längslinie des Flügels durch den Punkt *o* gerichtet und proportional der Masse des Flügels, der Winkelgeschwindigkeit und dem Quadrat des Trägheitshalbmessers des Flügels mit Bezug auf diese Gelenkaxe ist. Soweit aber diese Wirkung in die q-Richtung entfällt, wird durch sie wegen der symmetrischen Wirkung beider Körperhälften die Bewegung des Rumpfes nicht beinflusst; die entsprechende Aenderung des Bewegungszustandes des gemeinsamen Schwerpunktes beider Flügel in querer Richtung ist ebenfalls gleich 0. Die in die Sagittalebene entfallende Componente aber, welche sich in eine z- und v-Componente zerlegt, wächst mit dem Sinus des Winkels γ, welchen die Längslinie des Flügels mit der q-Axe bildet; und zwar wächst die verticale Componente mit dem Cosinus des Winkels α, den die Längslinie mit der v-Axe bildet, und die z-Componente mit dem Cosinus des Winkels β, in welchem jene Linie zur z-Axe steht.

Ist der Flügel gehoben, so wird der Rumpf in den Gelenken nach oben gezogen, ist er vorgeführt, nach vorn u. s. w. Im ersten Fall werden abwärts treibende, im zweiten rückwärts treibende Kräfte des Rumpfes zur Fixirung von *o* verbraucht; der Flügelschwerpunkt wird dementsprechend im ersten Fall durch eine abwärts treibende, im zweiten Fall durch eine rückwärts treibende Kraft in seinem Bewegungszustande beinflusst u. s. w.

4. Die Kraft Df, welche vom Rumpf aus durch *o* auf den Flügel wirken muss, damit das an sich mit gleichförmiger horizontaler Geschwindigkeit bewegte Gelenkende *o* den resultirenden Oscillationen des Rumpfes folgt.

Eine solche Einwirkung modificirt natürlich die Bewegung des Flügelschwerpunktes so, als ob sie direkt die in ihm concentrirt gedachte Masse des Flügels treffen würde, und wird überdies den Flügel um seinen Schwerpunkt drehen, resp. die Drehbewegung des Flügels um den Punkt *o* beeinflussen.

Auch hier handelt es sich um ein wichtiges, häufig in Be-

tracht kommendes Problem der Mechanik. Auf Seite 158 wurde die Lage des Punktes ε bestimmt, der dadurch ausgezeichnet ist, dass die in ihm senkrecht zur Flügellängslinie angreifenden Kräfte fürs erste dem Gelenkende o des Flügels keine Beschleunigung ertheilen. Nun ist leicht nachzuweisen, dass umgekehrt Kräfte die in o senkrecht zur Längslinie wirken, fürs erste den Punkt ε nicht beeinflussen. Denn irgend eine derartige Kraft χ ertheilt dem Schwerpunkt des Flügels und also auch dem Punkt ε eine Beschleunigung $\frac{\chi}{M}$ und dem Flügel gleichzeitig eine Drehung um den Schwerpunkt, deren Winkelbeschleunigung $= \frac{\chi l}{MR^2}$ ist und in Folge deren der Punkt ε sich mit der Geschwindigkeit $\frac{\chi l}{MR^2} \cdot \varrho$ in der entgegengesetzten Richtung bewegt. Da nun $\varrho l = R^2$ so ist $\frac{\chi}{M} = \frac{\chi l}{MR^2} \cdot \varrho$ absolut genommen. Die resultirende Beschleunigung von ε ist demnach $= 0$.

Hierbei bedeutet M die Masse des Flügels, l den Schwerpunktshalbmesser, R den Trägheitshalbmesser mit Bezug auf Schwerpunktsaxen, die senkrecht zu l stehen, ϱ den Abstand des Punktes ε vom Flügelschwerpunkt s.

Man kann sich nun eine bestimmte sehr kleine Beschleunigung φ des Gelenkendes o des Flügels (Fig. 20) in einer bestimmten geraden Linie oo^1, bei irgend einer Stellung der Längslinie os des Flügels, welche durch den Winkel α gemessen ist, dadurch zu Stande gebracht denken, dass der Punkt o durch eine in der Richtung von o nach s hin wirkende Kraft die Beschleunigung $\varphi \cos \alpha$ erhält und zugleich durch eine zweite Kraft, in der zur Flügellängslinie senkrechten Richtung von o nach n hin die Beschleunigung $\varphi \sin \alpha$. Der erstgenannten Einwirkung entspricht eine Beschleunigung des Flügelschwerpunktes, die ebenfalls $= \varphi \cos \alpha$ ist; der letzteren die Schwerpunktsbeschleunigung $\varphi \sin \alpha$

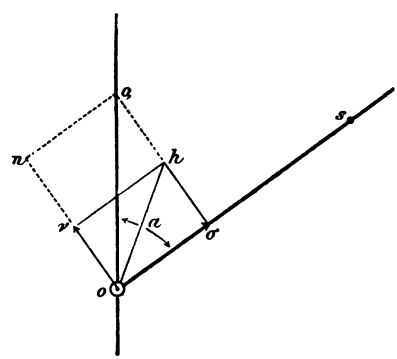


Fig. 20.

$\frac{\lambda}{\lambda - l}$. Die beschleunigenden Kräfte aber, welche mit *ob* und *ov* bezeichnet werden sollen, müssen ihren Einwirkungen auf die Gesammtmasse des Flügels proportional sein.

Die Resultirende *oh* der beiden Kräfte wird im allgemeinen nicht die Richtung *os* haben, sondern mit der Längslinie des Flügels einen bestimmten Winkel ξ bilden, und zwar hat die Kraft *oh* immer eine mittlere Richtung zwischen der Richtung der zum Flügel längs gerichteten Kraft und derjenigen der resultirenden Beschleunigung von *o*.

$oh = \sqrt{\varphi^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{\lambda - l}{\lambda}\right)^2 + \varphi^2 \cos^2 \alpha}\, M$, wobei M die Masse des Flügels bedeutet

Minimum für $\alpha = 90^0$

$$oh = \varphi \frac{\lambda - l}{\lambda} M.$$

Maximum für $\alpha = o$

$$oh = \varphi . M.$$

Die Richtung, in welcher das Flügelende beschleunigt werden muss, ist nun immer eine sagittale.

Durch Projection von *oh* auf die Sagittalebene erhält man die Grösse und Richtung der nöthigen sagittalen Componente, die quere Componente wird von selbst wach gerufen, wenn die sagittale wirksam ist.

Durch eine nach oben gerichtete Beschleunigung des Punktes *o* wird die Drehung des Flügels im Sinne des Niederschlages, durch Beschleunigung von *o* abwärts wird sie im Sinne der Hebung beschleunigt; der Schwerpunkt des Flügels aber wird im selben Sinn, wenn auch weniger beschleunigt als der Punkt *o*.

Wenn die Schulter von einem mittleren Niveau aus nach unten oscillirt, so verlangsamt sich ihre Abwärtsbewegung, wird schliesslich gleich *o*, und die Abänderung der Geschwindigkeit geht in demselben Sinne noch weiter, da die Schulter allmählich eine maximale Aufwärtsgeschwindigkeit erlangt. Während dieses Zeitraums erfährt der Punkt *o* des Flügels durch den Rumpf in seiner Abwärtsbewegung eine Hemmung, resp. er erfährt eine aufwärts gerichtete Beschleunigung. — Umgekehrt verhält es sich, wenn die Schulter von der Mittellage aus nach oben oscillirt und von oben zur Mittellage zurückkehrt.

Dem höchsten Stande des Rumpfes entspricht ungefähr das Maximum in der verticalen Beschleunigung

der Gesammtmasse des Flügels abwärts und in der Drehbeschleunigung des Flügels im Sinne der Hebung, dem Tiefstande des Rumpfes das Maximum in der Aufwärtsbeschleunigung der Gesammtmasse des Flügels und der Drehbeschleunigung im Sinne des Niederschlages.

Die Grösse der auf diese Weise hervorgebrachten Drehungen des Flügels ist so gering, dass man die Centrifugalwirkungen bei denselben vernachlässigen kann.

Aber auch der ganze Bewegungsaustausch an der Gelenkaxe zwischen Rumpf und Flügel in verticaler Richtung, den die geschilderte Mitbewegung des Flügels fordert, ist gering, da die Beschleunigungen des Punktes o selbst nur klein sind, diejenigen der Gesammtmasse des Flügels also noch erheblich kleiner.

Ganz ähnlich wie bei den verticalen Oscillationen ist das Verhalten hinsichtlich der z-Oscillationen des Punktes o mit dem Rumpfe.

5. Die nothwendigen inneren Gelenkdrehkräfte.

Jede innere Gelenkdrehkraft lässt sich hinsichtlich ihrer beschleunigenden Einwirkung auf Rumpf und Flügel ersetzen durch eine Kraft und Gegenkraft in der ε-Tangentenebene ($p_{\mu tg}$ und $-p_{\mu tg}$ pg. 126 u. ff.), und die Wirkung auf den Flügel $p_{\mu tg}$ lässt sich weiterhin ersetzen 1) durch eine in der ε-Tangentenebene durch ε gerichtete Kraft p_ε, welche parallel, gleichgerichtet und gleich ist wie $p_{\mu tg}$, und 2) durch ein Kräftepaar, welches den Flügel parallel der ε-Tangentenebene um den Schwerpunktshalbmesser als Axe zu drehen strebt. An dem Einfluss der innern Kraft auf die Drehung des Flügels um o wird dadurch nichts geändert; das Moment der Drehung um den Schwerpunktshalbmesser bleibt, wie schon gezeigt worden ist, dasselbe; ebenso das Moment der Drehung um die o-Gelenkaxe, welche zu der Kraftebene von p_z senkrecht steht (eine andre senkrecht zur Flügellängslinie gerichtete Axe aber kommt nicht in Betracht).

So viele verschiedene innere Gelenkdrehkräfte vorhanden sein mögen, immer lassen sich alle p_ε Componenten zu einer einzigen p_z Kraft vereinigen und alle Kräftepaare der ε-Tangentenebene zu einem einzigem Kräftepaar, welches den Flügel um den Schwerpunktshalbmesser zu drehen strebt. Die erstgenannte Resultirende sei mit G_ε bezeichnet, ihr Drehungsmoment um $o = G_\varepsilon . \lambda$,

das Moment der Drehkraft um die Flügellängslinie mit $G_\varepsilon . k$; die resultirende Gegenwirkung auf den Rumpf entspricht dann einer Kraft G_ε von gleicher Grösse, aber entgegengesetztem Sinn der Einwirkung, gelegen in der ε-Tangentenebene im Abstande k von ε.

Die beschleunigende Einwirkung der gesammten innern Gelenkdrehkräfte auf die Flügelmasse oder auf den Flügelschwerpunkt, ist gleich G_ε nach Grösse, Richtung und Sinn der Einwirkung. Diese Kraft zerlegt sich nach der v-, z- und q-Richtung in die 3 Componenten $G_{\varepsilon v}$, $G_{\varepsilon z}$ und $G_{\varepsilon q}$. Sind die beiden ersten und die Stellung der Flügellängslinie bekannt, so lässt sich $G_{\varepsilon q}$ daraus berechnen wie folgt:

Man legt durch den Angriffspunkt von G_ε in ε oder s zwei Kreise, parallel der qz-Ebene um die v-Axe und parallel der qv-Ebene um die z-Axe und zerlegt zunächst G_ε in der ε-Tangentenebene in 2 Componenten, welche tangential zu diesen 2 Kreisen liegen. Ist α der Winkel, welchen die Projektion der Flügellängslinie auf die q-Ebene mit der v-Richtung oben aussen macht, und β der Winkel, welchen die Horizontalebenenprojektion der Flügellängslinie mit der z-Axe vorn aussen bildet, so ist $\frac{G_{\varepsilon v}}{tg\alpha}$ die quere Componente, welche die Kraft $G_{\varepsilon v}$ zu der Tangentialkraft am verticalen Parallelkreis ergänzt, und $\frac{G_{\varepsilon z}}{tg\beta}$ diejenige quere Componente, welche zusammen mit $G_{\varepsilon z}$ die Tangentialkraft zum horizontalen Parallelkreis giebt. Die quere Componente der ganzen Kraft G_ε ist demnach $= \frac{G_{\varepsilon v}}{tg\alpha} + \frac{G_{\varepsilon z}}{tg\beta} = G_{\varepsilon q}$.

Man erkennt, dass die quere Componente im allgemeinen um so grösser ist, je mehr die horizontale und die quere Componente eine Resultirende geben, welche direkt gegen die q-Axe gerichtet ist, je grösser diese Resultirende ist und je mehr die Linie os im rechten Winkel zur q-Axe steht.

Es handelt sich also nur darum, die Grösse der v- und z-Componente von $G\varepsilon$ zu bestimmen oder, was dasselbe ist, diejenige verticale und sagittale Kraft, welche in irgend einer Phase, abgesehen von den bereits näher besprochenen äusseren Kräften am Flügel und von den inneren Gelenkaxenkräften, noch auf den Flügel einwirken müssen, um seiner Gesammtmasse die in dieser Phase nothwendige resultirende Beschleunigung zu geben.

a. Berechnung von $G_{\varepsilon v}$ und $-G_{\varepsilon v}$.

Folgende Tabelle giebt eine Uebersicht über die Kräfte, welche den Flügel- und Rumpfschwerpunkt in verticaler Richtung beschleunigen.

Es wirkt vertical beschleunigend	auf den Flügelschwerpunkt		auf den Rumpfschwerpunkt	
Die Schwerkraft (abwärts)	F	durch o: $-F\frac{\lambda-l}{\lambda}-F\frac{l}{\lambda}\cos^2\varphi$	durch o: $F\frac{\lambda-l}{\lambda}+F\frac{l}{\lambda}\cos^2\varphi$	$+R$
Der Luftwiderstand (aufwärts)	W_{fv}	$-W_{fv.o}$	W_{fvo}	$+W_{rv}$
Centrifugalhemmung		C_{fv}		
Centrifugalkraft			$-C_{fo}$	
Bewegungsaustausch in o für die resultirende Beschleunigung von o		D_{fv}	$-D_{fv}$	
Resultirende innere Gelenkdrehkraft	$G_{\varepsilon v}$			$-G_{\varepsilon v}$
Summa: (Resultirende Einwirkung)		A_f	A_r	

Die von einer dunklen Linie umschlossenen Grössen dieser Tabelle stellen die inneren Kräfte und Gegenkräfte dar, deren resulirende Einwirkung auf den Flügel- resp. Rumpfschwerpunkt früher mit I u. s. w. bezeichnet worden ist (pg. 108 u. ft). Es leuchtet ohne Weiteres ein, dass und wie $G_{\varepsilon v}$ aus den übrigen den Flügelschwerpunkt vertical beschleunigenden Kräften und der resultirenden, beschleunigenden, verticalen Einwirkung auf denselben berechnet werden kann.

Im Folgenden (Fig. 21) soll versucht werden, die Kräftecurve der periodisch sich ändernden Grösse $G_{\varepsilon v}$ und ihr Verhalten zu der Kräftecurve von I annähernd festzustellen. Wir benutzen dabei

dasselbe Princip der graphischen Darstellung, wie bereits bei den Figuren 16 und 17.

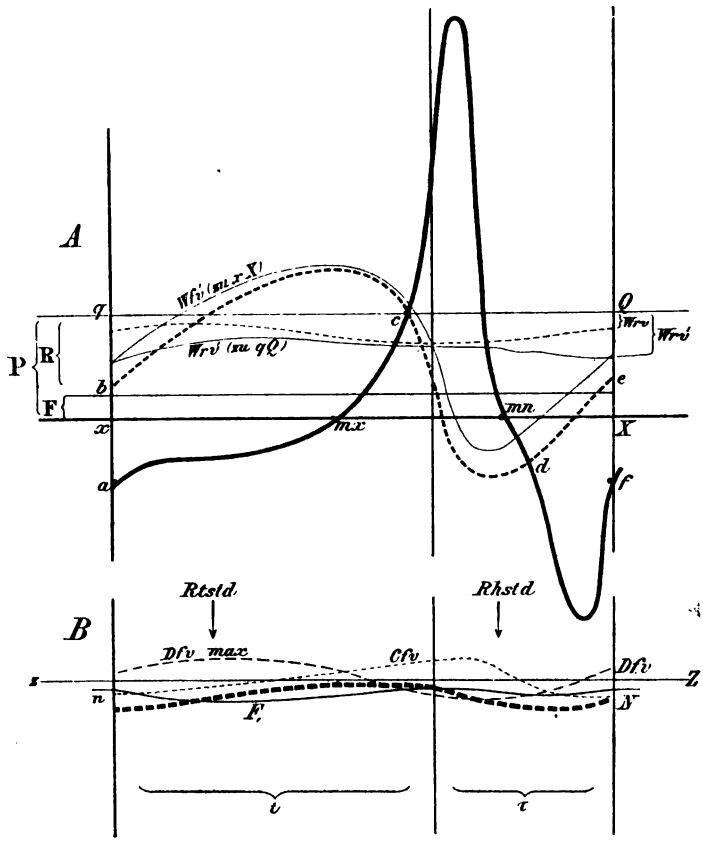


Fig. 21.

Längs der Abscissenaxe xX vollzieht sich der Fortschritt in der Zeit, die Ordinaten geben die Grösse der Kraft, die Kräftefelder der Curven sind ein Mass für die beschleunigende Einwirkung auf die Masseneinheit während einer bestimmten Zeit. Der Abstand der Parallelen qQ von xX giebt die Grösse des Gesammtgewichtes, wovon ca. 5 Theile auf das Rumpfgewicht R und 1 Theil auf das Flügelgewicht F entfallen. Dem Kräftefeld, welches zwischen xX und qQ in der Zeit $t + \tau$ eingeschlossen ist, muss das Kräftefeld des gesammten verticalen Widerstandes an Rumpf und Flügel an Grösse gleichkommen. Der Abstand der fein punk-

tirten Curve unterhalb qQ von dieser Linie giebt die Grösse des Rumpfwiderstandes in den verschiedenen Phasen der Periode. Der Abstand der benachbarten fein ausgezogenen Curve von qQ giebt die Grösse des verticalen Widerstandes, soweit er nicht blos am Rumpf selbst entwickelt wird, sondern auch soweit der verticale Widerstand am Flügel sich auf den Rumpf durch das Gelenk o überträgt. Wir wollen diese gesammte Einwirkung für irgend eine Phase mit W_{rv}' bezeichnen. Das Kräftefeld, welches zwischen der fein ausgezogenen Curve $W_{rv}{}^1$ und der Linie xX in der Zeit $t + \tau$ eingeschlossen wird, ist dann ein Mass für die gesammte Einwirkung der verticalen Componente des Flügelwiderstandes, soweit sie wirklich auf den Flügelschwerpunkt wirkt (Mass der Einwirkung von $W_{f.v} - W_{f.o} = W_{f\varepsilon.v}$). Die Curve dieses reducirten verticalen Flügelwiderstandes $W_{f\varepsilon.v}$ hat nun zwar eine andere Gestalt (in Fig. 21 *A* mit W_{fv}' zu xX bezeichnet); sie liegt in der zweiten Hälfte des Flügelniederschlages am höchsten über der Abscisse xX, im Anfang der Hebung sogar unter derselben. Aber die Summe der negativen und der positiven Antheile ihres Kräftefeldes muss dem Kräftefeld zwischen W_{rv}' und xX an Grösse gleich sein, was in unserer Figur möglichst berücksichtigt ist.

In Fig. 21 *B* ist möglichst nach demselben Massstabe (es sind Verhältnisse der Schätzung zu Grunde gelegt, wie sie etwa bei der Taube vorhanden sind) die Einwirkung der Schwere am Flügel, soweit sie sich nicht auf den Rumpf überträgt, sodann die Einwirkung Df und Cf graphisch dargestellt. Jene reducirte Wirkung der Schwere am Flügel $\left(F - F\frac{\lambda - l}{\lambda} - F\frac{l}{\lambda}\cos^2\varphi\right)$ kann mit F^1 bezeichnet werden.

Die Curve F^1 als von einer abwärts gerichteten Kraft liegt unterhalb der zugehörigen Abscisse zZ als eine fein ausgezogene Curve. Die Kraft, welche zum Gleichgewicht gegen die Centrifugalkräfte des Flügels vom Rumpf aus durch o auf den Flügel in verticaler Richtung wirken muss, ist aufwärts gerichtet, wenn der Flügel unten steht, und abwärts gerichtet, wenn er gehoben ist; sie ist absolut am grössten vor der Mitte der Flügelhebung. In Fig. 21 *B* ist sie durch den Abstand der fein punktirten Curve von $z.Z$ dargestellt. Die aus feinen Strichen zusammengefügte Curve dieser Figur endlich, in ihrem Abstand von zZ giebt ein Mass für die Einwirkung von D_{fv}, welche Kraft ja, wie nachgewiesen wurde, während des Tiefstandes des Rumpfes (bei *R.tstd*

in Fig. 21 *B*) zu Anfang und in der Mitte des Flügelniederschlages aufwärts, beim Hochstande dagegen (*R.hstd.* in Fig. 21 *B*) abwärts gerichtet ist.

C_{fv} und D_{fv} heben sich zeitweise gegenseitig mehr oder weniger auf (bald nach Beginn der Flügelhebung und im Anfang des Flügelniederschlages); beide zusammen wirken aufwärtstreibend nach der Mitte des Flügelniederschlages und abwärtstreibend nach der Mitte der Hebung und wirken dann also dem Einfluss des Flügelgewichtes im ersten Fall entgegen, während sie ihn im zweiten Fall unterstützen.

C_{fv}, D_{fv} und F^1 zusammen haben also wohl im Ganzen pro Periode eine abwärtstreibende Wirkung wie F_1 für sich allein. Diese Wirkung hat aber nach der Mitte des Niederschlages ein Minimum, nach der Mitte der Flügelhebung ein Maximum. (Stark punctirte Curve in Fig. 21 *B*).

Combiniren wir diesen Einfluss mit demjenigen von $W_{fv'}$, so erhalten wir eine Einwirkung, welche in Fig. 21 *A* durch die stark punktirte Curve *bcde* dargestellt ist. Der Abstand dieser Curve von *xX* giebt ein Mass für die Einwirkung sämmtlicher verticaler Kräfte auf den Flügelschwerpunkt, mit Ausnahme von $G_{\varepsilon v}$

Wenn nun die Curve *amx c mn df* in ihrem Abstande von *xX* die resultirend auf die Gesammtmasse des Flügels im Flügelschwerpunkt einwirkende verticale Kraft darstellt, so wird $G_{\varepsilon v}$ gemessen durch den Abstand dieser Curve von der Curve *bcde*. $G_{\varepsilon v}$ wirkt abwärts auf den Flügel, wo *amx c mn df* unterhalb *bcde* liegt, aufwärts im entgegengesetzten Fall. Wirklich ist leicht einzusehen, dass durch Hinzufügung einer solchen Kraft $G_{\varepsilon v}$ die schon in der Curve *bcde* zu *xX* berücksichtigten verticalen Kräfte am Flügel gerade zu den resultirenden verticalen Kräften am Flügelschwerpunkt ergänzt werden (Curve *amx c mn df*).

b. Berechnung von $G_{\varepsilon z}$ und $-G_{\varepsilon z}$.

Die Berechnung der horizontal-sagittalen Componente der resultirenden inneren Gelenkdrehkraft G_ε geschieht genau nach demselben Princip, wie diejenige der verticalen Componente. Auch hier handelt es sich um ein Oscilliren um ein mittleres Niveau (das nun freilich durch eine *q-v* Ebene dargestellt wird), also auch um ein periodisches Gleichgewicht der resultirenden Beschleunigungen, sowohl am Ganzen als an den einzelnen Theilen. Das

Besondere besteht nur darin, dass 1) jenes mittlere Niveau sich mit gleichförmiger horizontaler Geschwindigkeit v pro Secunde (oder mit der Geschwindigkeit vT pro Periode) vorwärts bewegt, 2) darin, dass nicht die Schwere die zu überwindende schädliche äussere Einwirkung darstellt, indem dieselbe ja die horizontale Bewegung des Ganzen nicht beeinflusst, dass dafür aber schädliche Luftwiderstände eine viel grössere Rolle spielen, als beim verticalen Theil der locomotorischen Thätigkeit.

Man übersieht die horizontalen Bewegungen und Bewegungsänderungen am besten bei Betrachtung des fliegenden Vogels von der Seite oder von unten her; besonders instructiv ist es, wenn man sich das System mit seinen Bewegungen auf die Horizontalebene projicirt denkt; hierbei werden die verticalen Componenten eliminirt, die z- und q-Componenten aber kommen voll und ganz zur Geltung. In diesem Fall ist es eine mit der Geschwindigkeit v gleichmässig vorbewegte Querlinie qq, mit Bezug auf welche die Bewegungen in der z-Richtung sich als periodisch oscillirende darstellen.

Man kann sich aber auch jenes mittlere Niveau, welches durch eine qv. Ebene dargestellt ist, oder in der Horizontalebenenprojection die erwähnte Querlinie qq ruhend denken und statt dessen annehmen, dass der umgebende Raum oder besser gesagt das umgebende Luftmedium mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v an dem hin und her oscillirenden Vogel vorbei rückwärts bewegt werde.

Dass der Flügel in der z-Richtung hin und her oscillirt, und dass die Excursionen nach der Flügelspitze hin zunehmen, ist ohne weiteres klar und wird durch die blosse Beobachtung genügend sicher gestellt. Da aber der Rumpf beim horizontalen Normalfluge niemals, der Flügel aber auch nicht während der ganzen Periode, sondern nur zeitweise und dabei in allmählich zu- und abnehmendem Maasse einen nützlichen vorwärts gerichteten Widerstand erzeugt, so folgt, dass auch der gemeinsame Schwerpunkt des Ganzen gegenüber dem mittleren Niveau hin und her oscilliren muss.

Wir nehmen an, dass in der Regel gegen das Ende der Flügelniederbewegung der weitaus stärkste vorwärts gerichtete Flügelwiderstand erzeugt wird und gegen das Ende der Flügelhebung der geringste. Es folgt hieraus, dass der Gesammtschwerpunkt im erstgenannten Zeitpunkt und auch noch ganz am Schluss des Niederschlages, währenddem die relative Rückführung des Flügels

mit der grössten Geschwindigkeit vor sich geht, am weitesten zurückliegt, und dass er seine vordere Extremlage zum mittleren *qv* Niveau erreicht gegen Ende der Flügelhebung, jeweilen also etwas später als er seine tiefste und höchste Lage erreicht.

In Fig. 22 *A* beziehen sich die 3 Curven *ss*, $\Sigma\Sigma$ und *SS* auf

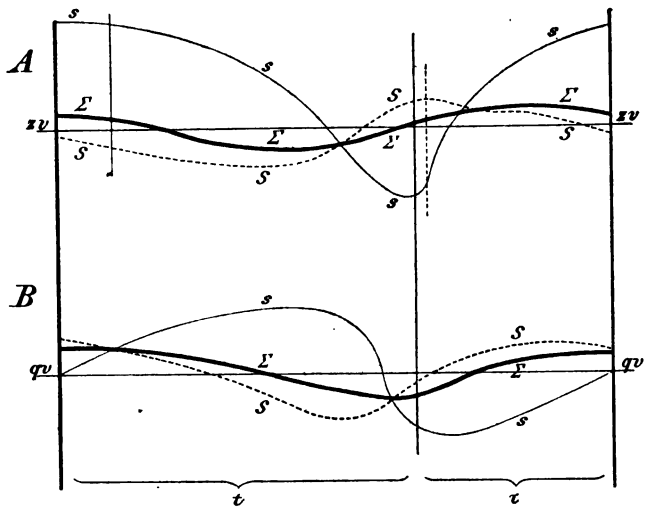


Fig. 22.

die Axe *zv-zv* und erläutern die verticale Oscillation des Flügelschwerpunktes *s*, des gemeinsamen Schwerpunktes Σ und des Rumpfschwerpunktes *S* gegenüber dem Niveau einer Horizontalebene *zv* während einer Periode $t + \tau$.

Die 3 unteren Curven dagegen in ihrer Beziehung zur Abscisse *qv* erläutern die gleichzeitige *z*-Bewegung derselben 3 Punkte gegenüber einer Querebene *qv*.

Der Deutlichkeit halber und um möglichst allen Verhältnissen gerecht zu werden, wurde angenommen, dass die Oscillationen des gemeinsamen Schwerpunktes erheblich gross sind. Es ist nun in der That leicht einzusehen, wie sich die Verhältnisse ändern müssen, wenn jene Oscillationen relativ geringer sind.

Es besteht natürlich auch in der *z*-Richtung ein periodisches Gleichgewicht der Kräfte. Auch hier gilt es festzustellen, wie in jeder einzelnen Phase durch die äusseren Kräfte und den Bewegungsaustausch in *o* die Bewegung des Rumpfschwerpunktes und des Flügelschwerpunktes beeinflusst wird, und welche Ge-

lenkdrehkräfte in der durch ε senkrecht zur Längslinie des Flügels gelegten Ebene wirken müssen, um jene Wirkung zu der bekannten resultirenden Einwirkung auf die Partialschwerpunkte zu ergänzen.

Ich habe nicht die Absicht, mit Bezug auf die Bestimmung von $G_{\varepsilon z}$ so sehr ins Einzelne einzugehen, wie bei der Bestimmung von $G_{\varepsilon v}$. Es genügt, das Princip der Analyse festgestellt zu haben. Auch kennen wir vorderhand die Form der Bewegung gerade mit Bezug auf die z-Componenten der Widerstände noch zu wenig. Ihre Beurtheilung ist eine ausserordentlich schwierige und complicirte. Nur um dies recht deutlich zu machen, habe ich die Fig. 23 entworfen. Ich will durch dieselbe nur zeigen,

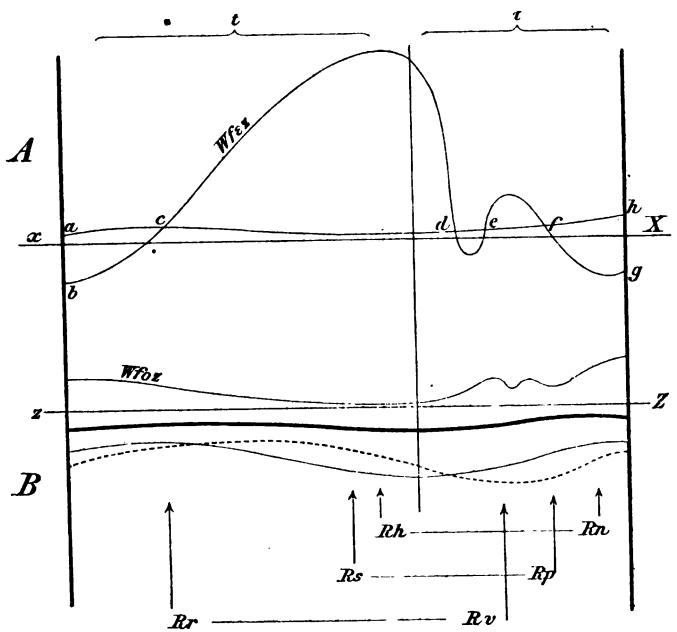


Fig. 23.

wie die Grössen $W_{f\varepsilon z}$, $W_{fo.z}$ und W_{rz} von den verschiedensten Verhältnissen abhängen. Die Art und Weise aber, wie in dieser Figur die einzelnen Faktoren abgeschätzt sind, kann kaum auch nur als eine annähernd zutreffende bezeichnet werden.

In dem oberen Theil A der Figur ist die Abänderung von $W_{f\varepsilon z}$ in der Zeit durch den Abstand der entspechend bezeichneten

Curve von der Abscisse xX dargestellt: Maximum des vorwärts gerichteteten Widerstandes am Ende des Flügelniederschlages, Maximum des rückwärts gerichteten am Ende der Hebung; im Moment des hauptsächlichen Umwendens des Flügels aus der pronirten in die supinirte Stellung einen kurzen Moment lang vielleicht ebenfalls ein rückwärts gerichteter Widerstand (zwischen *d* und *e*), darauf bei der stärksten Hebung des supinirten Flügels ein Widerstand an der Dorsalseite mit vorwärts gerichteter Componente. Dabei ist für W_{fz} nur der Widerstand auf die Breitseiten des Flügels berücksichtigt. Die $z\varepsilon$ Componente des Widerstandes auf den vorderen Flügelrand, die stets schädlich wirkt, wird durch den Abstand der Curve *acdefh* von xX dargestellt. Es muss die Curve W_{fz} auf diese Linie $ac...h$ bezogen werden, damit sie die Abänderung der resultirenden $z\varepsilon$ Componente des ganzen Flügelwiderstandes darstellt.

Im untern Theil *B* der Figur zeigt die Curve W_{fo} in ihrem Abstand von zZ die Abänderung der z-Componente des auf *o* entfallenden Flügelwiderstandes (Maximum am Ende der Flügelhebung, Minimum am Ende des Flügelniederschlages).

Der Abstand der Curve W_{rk} von zZ soll der z-Componente des Widerstandes entsprechen, welcher an dem Vorderende des Rumpfes erzeugt wird. Dieser Widerstand ist ziemlich constant, der Rest des z-Widerstandes am Rumpfe, an der schrägen, drachenartig gestellten Unterseite vornehmlich entwickelt, wechselt mehr oder weniger, je nachdem die verticalen und horizontalen Oscillationen des Rumpfes erheblich sind oder nicht, und je nachdem die Aenderungen der Supinationsstellung des Rumpfes in Betracht kommen oder nicht. Mit *Rs* und *Rp* sind die Zeitmomente bezeichnet, denen muthmasslich die grösste Supinations- und die grösste Pronationsstellung des Rumpfes entspricht, mit *Rh* und *Rn* die Momente der grössten Hebungs- und Senkungsgeschwindigkeit des Rumpfes, mit *Rz* und *Rv* die Momente seiner geringsten und grössten Vorwärtsgeschwindigkeit.

Entsprechend dem Abstand der Curve *dd* von *Wrk* mag sich die genannte z-Componente des Widerstandes an der Unterseite des Rumpfes verhalten, wenn die verticalen Oscillationen des Rumpfes nicht sehr erheblich sind, wie $d'd'$ aber, wenn die Aenderungen der Supinationsstellung des Rumpfes weniger ins Gewicht fallen.

Alle die bei *B* dargestellten Einwirkungen sind schädliche, rückwärts gerichtete Widerstände; ihre Gesammtwirkung wird ge-

messen durch das ganze zwischen $W_{fo z}$ und dd resp. $d'd'$ liegende Kräftefeld. Dazu kommt die schädliche Einwirkung des auf den Punkt ε entfallenden Flügelwiderstandes, dargestellt durch die Kräftefelder abc, de und fgh in Fig. 23 A; der Summe aller dieser Kräftefelder der Einwirkungen — z auf Rumpf oder Flügelschwerpunkt müssen die Kräftefelder der Einwirkung z am Flügel, nämlich cd und ef an Grösse gleichkommen, wenn anders Gleichgewicht der äussern z-Kräfte und horizontaler Normalflug bestehen soll.

Wir wollen annehmen, dass die Curve des sagittalen Widerstandes $W_{fo z}$ und diejenige der sagittalen Componente von $W_{f\varepsilon z}$ annähernd richtig bestimmt, ebenso die Curve der resultirenden horizontal-sagittalen Kräfte am Flügelschwerpunkt aus der thatsächlich beobachteten Oscillationsbewegung zu dem mittleren querverticalen Niveau richtig ermittelt worden sei. Die Differenz zwischen der Wirkung von $W_{f\varepsilon z}$ auf den Flügelschwerpunkt und der resultirenden Einwirkung sämmtlicher Kräfte am Flügel kann nur durch weitere innere Kräfte, die vom Rumpf aus auf den Flügel wirken, ausgeglichen sein. Und zwar handelt es sich auch hier wieder:

1) um Hemmung der Centrifugalwirkung der vom Flügel erworbenen Geschwindigkeiten bei der Drehung um die o-Axe;

2) Ferner um diejenigen Einwirkungen des Rumpfes auf den Flügel, welche stattfinden müssen, damit das in Folge der übrigen Einflüsse mit gleichmässiger z-Geschwindigkeit fortbewegte Gelenkende des Flügels den resultirenden horizontalen Oscillationen des Rumpfes folgt.

3) Es kommt aber ausserdem noch in Betracht eine innere Gelenkaxenkraft, welche durch das Gewicht des Flügels hervorgerufen wird. Sobald nämlich die Längslinie des Flügels nicht mit der qv-Ebene zusammenfällt, hat der Theil des Flügelgewichtes, welcher durch o auf den Rumpf wirkt, eine z Componente

$$F_{oz} = F \frac{l}{\lambda} \cos \alpha . \sin \alpha . \cos b \text{ (S. pg. 130).}$$

Die Uebertragung dieses Theils der Wirkung der Schwere am Flügel auf den Rumpf geschieht in der Weise, dass er sich als Druck oder Zug des Gelenkendes des Flügels im Gelenk gegenüber dem Rumpf äussert und durch eine entsprechende Gegenwirkung

des Rumpfes im Gleichgewicht gehalten wird. Der Rest der nothwendigen Einwirkung innerer Kräfte in der z-Richtung auf den Flügelschwerpunkt kommt auf Rechnung der Kraft $G_{\varepsilon z}$.

c. Berechnung von $G_{\varepsilon q}$ und $-G_{\varepsilon q}$.

Wie diese Grössen durch $G_{\varepsilon v}$ und $G_{\varepsilon z}$ bestimmbar sind, wurde bereits S. 140 erörtert. Besser als durch Rechnung geschieht die Bestimmung an einem Phantom, welches wesentlich die um einen festen Punkt o drehbare Flügellängslinie und 3 Hauptebenen durch o markirt.

Damit ist ein wichtiger Theil unserer Aufgabe gelöst. Wir haben gezeigt, wie bei Kenntniss der Form der symmetrischen Flugmaschine und ihrer Bewegung die resultirende innere Gelenkdrehkraft bestimmt werden kann, jene Kraft, welche in ε tangential zu der durch diesen Punkt um o gelegten Kugelfläche wirkt und alle inneren Gelenkdrehkräfte hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Drehung des Flügels um eine zu seiner Längslinie senkrechte Axe in o ersetzt.

6. Natur der innern Gelenkdrehkräfte.

Die Drehung der Längslinie des Flügels um den Punkt o kann thatsächlich, soweit es sich um innere Kräfte handelt, durch passive Hemmungsapparate, (Bänder- und Knochenhemmung, entgegenstehende Weichtheile, Haut, Bindegewebe, elastische Rückwirkung passiv zusammengepresster oder gedehnter Theile u. dgl.) gehemmt oder befördert werden. Sodann kommt die Spannung von passiv gedehnten Muskeln in Betracht. Endlich die Reibung an den Gelenkflächen.

Wenn man aber annimmt, dass beim gewöhnlichen normalen Fluge der Flügel nicht die Grenzen seines Verkehrsgebietes erreicht, also niemals so weite Excursionen von der Gelenkmittelstellung aus macht, dass seine Drehbewegung um irgend eine zu ihm senkrecht stehende Gelenkaxe durch die Gelenkverbindung selbst gehemmt wird; berücksichtigt man ferner, dass in der Regel das Bindegewebe und Fett zwischen den Muskeln am Schultergelenk durch Luft ersetzt, die Haut aber dünn und bei den gewöhnlichen Excursionen nicht gespannt ist, so folgt, dass ausserhalb des Gelenkes wesentlich nur die Spannung der Muskeln, an der Gelenkverbindung selbst nur die Reibung in Betracht kommen

kann. Die Reibung kann für's Erste vernachlässigt werden. (Ich behalte mir übrigens vor, über die Einrichtung des Schultergelenkes der Vögel an anderer Stelle einige genauere Mittheilungen zu machen). Das Ergebniss unserer Untersuchung würde also sein: die Bestimmung der in jeder Phase in einer Tangentenrichtung durch ε nothwendigen Muskelspannung nach Grösse und Richtung und die Bestimmung des Drehungsmomentes dieser Muskelkräfte mit Bezug auf die Drehung des Flügels um zwei ein für allemal bestimmt definirte Hauptgelenkaxen, welche zu einander und zur Längslinie des Flügels senkrecht stehen [1]).

Es erübrigt noch zu untersuchen, ob die innern Gelenkdrehkräfte nicht auch noch eine drehende Einwirkung um die Flügellängslinie haben. Nur wenn dies nicht der Fall ist, werden sie durch $G\varepsilon$ und $-G\varepsilon$ vollständig ersetzt. Haben sie aber eine pronirende oder supinirende Einwirkung auf den Flügel, so wird ihre Wirkung ersetzt durch eine Kraft $G_{\mu tg}$, welche in der ε Tangentenebene parallel zu G_ε in gleicher Grösse und Richtung, aber in einem bestimmten Abstand k von ε wirkt, und durch die entsprechende Gegenkraft am Rumpfe.

$G_\varepsilon k$ ist dann das resultirende Moment des Einflusses sämmtlicher inneren Gelenkdrehkräfte auf die Drehung des Flügels um seine Längsaxe, $G_\varepsilon \,.\, \lambda$ unter allen Umständen das Moment der Drehung parallel der Kraftebene der in ε angreifenden Kraft G_ε. (Vgl. pg. 124 und ff.).

Wir haben in unseren speziellen Ausführungen bis jetzt die Einwirkungen der inneren Gelenkdrehkräfte auf die Längsrotation des Flügels vernachlässigen können, weil thatsächlich durch sie

---

[1]) Marey und Tatin sind der Meinung, dass auf den Flügel wesentlich nur niederziehende und hebende Muskelkräfte einwirken. Die in der z-Richtung nothwendigen Gelenkdrehkräfte müssten dann durch passive Einflüsse (Bänder- und Knochenhemmungen) vermittelt sein. Ich bin aber der Meinung, dass beim gewöhnlichen Fluge auch der horizontale sagittale Ausschlag des Flügels nicht bis zu den Grenzen des Excursionsgebietes erfolgt, vielmehr innerhalb desjenigen Verkehrsgebietes sich hält, bei welchem die Drehbewegungen im Gelenk so gut wie ungehemmt vor sich gehen können. Demnach müssen es die Muskeln sein, welche die z-Componenten der innern Gelenkdrehkräfte liefern. Eine grössere Rolle spielen die passiven Hemmungen höchstens nur für das Ende des Niederschlages und der Vorführung des Flügels. Dieser Punkt soll später noch etwelche Berücksichtigung finden.

die Bewegung des Flügel-Rumpfschwerpunktes nicht beeinflusst wird. Wohl aber spielen diese Drehkräfte mit Bezug auf die Regulation der Flügelstellnng bei ihrer Bewegung gegen die Luft eine grosse Rolle. Für die Bewegung des Rumpfes ist es dagegen weniger wichtig, ob die Kraft $G_{\mu t g} \parallel G_\varepsilon$ mit G_ε zusammenfällt oder in einiger Entfernung von dieser Kraftlinie auf den Rumpf einwirkt.

δ. Die pronirenden und supinirenden Kräfte am Flügel und die Einflüsse, welche den Rumpf und das ganze System zu drehen streben.

a. Rotirende Einflüsse am Flügel.

Die gesammte Drehung des Flügels ist pro Periode resultirend $= o$. Der Flügel hat je nach einer Periode genau wieder dieselbe relative Stellung zum Rumpf. Wird die Drehung in Drehungen um 3 Axen von gleichbleibender Richtung zerlegt, so ist auch bezüglich jeder dieser Axen die Drehung pro Periode $= o$ oder 360°. Nicht dasselbe kann gelten für 3 Axen, die zwar stets zu einander senkrecht stehen, aber ihre Richtung im Raum von Moment zu Moment ändern, wie dies bei den o-Transversalaxen des Flügels und der Längsaxe der Fall ist. Es lässt sich zeigen, dass der Flügel nicht seine ursprüngliche relative Stellung zum Rumpf wiedererlangen würde, wenn er bloss durch Kräfte, die in der Längsaxe angreifen, herumgeführt würde. (Solches ist leicht ersichtlich, wenn man sich z. B. den Flügel in dieser Weise entlang den 3 Seiten eines von 3 zu einander senkrechten Meridianen umschlossenen Kugeloctanten herumgeführt denkt).

Wenn der Flügel so bewegt wird, dass die Sagittalprofile dieselbe Richtung beibehalten, so ist mit der Drehung um die Transversalaxen in o eine Längsrotation in supinatorischem Sinne verbunden, ebensowohl wenn die Flügellängslinie vorn sich senkt, als wenn sie hinten wieder in die Höhe geht, und eine Rotation in pronirendem Sinn, wenn sie nach vorn von der qv Ebene durch o sich hebt oder hinter ihr sich senkt.

Da nun thatsächlich am Ende des Niederschlages die Flügellängslinie vor der qv Ebene liegt, andererseits aber die Sagittalprofile pronirt werden, so müssen hier die Kräfte, welche auf den Flügel einwirken, neben der drehenden Wirkung um transversale Axen zwar vielleicht Anfangs noch eine geringe supinatorische Längsdrehung hervorrufen, zuletzt aber wirklich den Flügel in

pronirendem Sinne um seine Längsaxe drehen, wenn der Flügel gegen die *qv* Ebene zurückgeführt wird.

Bei der Flügelhebung aber, bei welcher anfangs eine rasche Umstellung der Sagittalprofile des Flügels in supinatorischem Sinne nothwendig ist, müssen die Kräfte, welche den Flügel in supinirendem Sinne drehen, um so erheblicher sein, zum mindesten wenn sich die Flügellängslinie hinter der *qv*-Ebene befindet.

Der Niederschlag beginnt mit einem noch etwas adducirten Flügel; falls die Supinationsstellung der Sagittalprofile dieselbe bleibt, müssen jetzt die Kräfte am Flügel eine geringe pronirende Einwirkung haben. Dasselbe gilt für den Beginn der Hebung, falls dabei die Pronationsstellung der Sagittalprofile sich nicht ändert und die Flügellängslinie noch vor der *qv* Ebene liegt (letzteres halte ich übrigens beim normalen Horizontalflug im Allgemeinen nicht für wahrscheinlich).

Der Angriffspunkt des Widerstandes liegt im Allgemeinen eher etwas nach hinten von der Längslinie (Schwerpunktshalbmesser) des Flügels, so dass der Widerstand wohl meist — abgesehen von dem Moment der steilsten Hebung des Flügels — eine rotatorische Nebenwirkung im Sinne der Pronation auf den Flügel als Ganzes hat. Man darf daher erwarten, dass die Muskeln, die auf den Flügel einwirken, im Allgemeinen eher ein supinirendes als ein pronirendes Moment haben. Ich habe vor Jahren Untersuchungen über die disponiblen Muskelkräfte am Schultergelenk einiger Vögel angestellt und meine Messungen auch (bei Buteo lagopus) auf die disponiblen rotirenden Kräfte am Flügel ausgedehnt. Ich fand — damals zu meinem grossen Befremden —, dass fast alle Parthien des grossen Brustmuskels (am meisten die Fasern, welche an der versteckten Fläche des Muskels zunächst dem *m*-Subclarius liegen, von dem Gabelknochen entspringen und sich an der Crista inferior humeri festheften), nicht, wie ich erwartete pronirend, sondern supinirend auf den Flügel bei den verschiedensten Stellungen desselben einwirken müssen. Sehr starke Supinatoren sind natürlich auch die vom Schulterblatt entspringenden und an der oberen Peripherie des humerus sich ansetzenden Muskeln, welche bei der ersten Hebung und Umrollung des Flügels betheiligt sind. Ihre rotatorische Wirkung bei der Flügelhebung wird vermuthlich durch die *MM.* coracobrachiales unterstützt. Pronatorisch wirkt dagegen der *M.* teres major.

b. Drehende Einflüsse am Rumpf und am ganzen System.

Der Rumpf kann bei symmetrischer Wirkung der Kräfte nur Drehungen parallel der Medianebene ausführen.

Aber auch von der Drehkraft am Flügel, welche in drei parallel den 3 Hauptebenen drehende Drehkräfte zerlegt werden kann, kommt nur die Componente parallel der *zv*-Ebene in Betracht, sobald wir nicht die drehende Einwirkung auf den einzelnen Flügel, sondern auf den Doppelflügel oder auf die Gesammtmasse ins Auge fassen. Und ebenso repräsentirt bei der Drehung des Flügels um eine transversal zum Flügel verlaufende Axe nur derjenige Theil der Drehung eine wirkliche Drehung des Doppelflügels, welcher (bei der Zerlegung der Drehung nach den 3 Hauptebenen) parallel der *zv*-Ebene oder um eine *q*-Axe erfolgt.

Mit dem Abstand der resultirenden Gelenkdrehkraft in der ε Tangentenebene von ε, oder mit ihrem rotirenden Einflusse auf den Flügel ändert sich natürlich auch die Wirknng der Gegenkraft auf den Rumpf. Man könnte auch die letztere ($— G_{\mu tg}$) ersetzen durch eine Kraft G_ε und eine Drehkraft in der ε Tangentenebene, deren Moment $= — G_{\mu tg} . k$ ist. Aber während nun für die Wirkungsweise des Flügels gegen die Luft eine kleine resultirende Umänderung der Rotationsstellung und deshalb auch eine geringe Verschiebung der Richtungslinie der Muskeln gegenüber der Längslinie bedeutend ins Gewicht fällt, sind dieselben Aenderungen an den auf den Rumpf wirkenden Gegenkräften im Verhältniss zu den übrigen drehenden Einflüssen von geringerem Belang.

Aenderungen in der relativen Bewegung der Fügellängslinie und in der Stellung der Flügelflächen während der einzelnen Phasen haben für die Drehung des Rumpfes einen viel grösseren Einfluss; desgleichen die thatsächlich vorkommenden Verschiedenheiten in der Richtung und Angriffsweise des Luftwiderstandes am Flügel und in der Lage des Schultergelenkes zum Rumpfschwerpunkt.

Alle diese Faktoren aber stehen, wie mir scheint, in einem gewissen Abhängigkeitsverhältniss zu einander, durch welches erreicht wird, dass pro Periode nicht bloss die Drehung des Rumpfes, sondern dass auch die Drehung des ganzen Apparates um seinen Schwerpunkt $= o$ ist, und zwar bei möglichst geringen oscillatorischen Drehungen des Rumpfes. [1])

[1]) Auf den Rumpf wirken folgende Kräfte:
1) die eigene Schwere,

Wären nur innere Kräfte wirksam, so würde jeder Drehung des Doppel-Flügels um die q-Axe eine entsprechende Gegendrehung des Rumpfes in jedem Augenblicke entsprechen, in jedem Moment wäre Gleichgewicht der Drehung vorhanden. Der Rumpf würde natürlich entsprechend seiner grösseren Masse einen viel geringeren Winkelbetrag der Drehung zeigen, als die Flügel. Eine Drehung der Gesammtmasse als solcher würde nicht zu Stande kommen. Es haben jedoch die äusseren Kräfte Einfluss auf die Drehung des Ganzen (um die q-Axe).

Die äusseren Kräfte des Systems, welche eine Drehung des Ganzen um eine durch den Gesammtschwerpunkt Σ gehende q-Axe hervorzurufeu vermögen, sind:

1) die sagittalen Componenten des Flügelwiderstandes in der ε Tangentenebene und in o,

2) die εv-Componenten des Rumpfwiderstandes.

Je grösser der Abstand dieser Kräfte vom Gesammtschwerpunkt ist, desto grösser ist ihre drehende Einwirkung.

Die εv-Componenten des Flügelwiderstandes in ε können an und für sich in ziemlich gleicher Weise entwickelt werden, ob nun der Flügel annähernd in derselben Ebene auf- und niederschlägt, oder mehr im Kreise herumgeführt wird. Was sich dabei aber in bedeutungsvoller Weise ändert, ist der Abstand jener ε-Componenten des Flügelwiderstandes von der durch Σ gelegten q-Axe.

Wenn nun auch durch Vorführung des Flügels der gemeinsame Schwerpunkt mit vorgeführt wird, so doch weniger als der Flügelschwerpunkt und noch weniger als der Angriffspunkt des Flügelwiderstandes. Wenn die Projektion von $W_{f\varepsilon}$ auf die Sagittalebene annähernd vertical ist, oder gar bei gehobenem Flügel (wegen Supination) aufwärts rückwärts, bei gesenktem Flügel (wegen Pronation) vorwärts aufwärts gerichtet, so wird der Flügelwiderstand mit zunehmender Vorführung des Flügels beim Niederschlag eine um so grössere Drehungseinwirkung in supinatorischem Sinne auf das Ganze haben.

---

2) der variable durch o auf den Rumpf sich übertragende Antheil des Flügelgewichtes,
3) der Rumpfwiderstand,
4) durch o ein Theil des Flügelwiderstandes,
5) durch o die Centrifugalwirkung des Flügels,
6) durch o die Kraft $— Df$,
7) $— G_{\mu tg}$ in der ε-Tangentenebene.

Als wesentlichste Gegenmittel hiergegen kann nur die Vermehrung des auf die hinteren Theile des Rumpfes von unten wirkenden Widerstandes in Betracht kommen.

Einem stärkeren nach vorn Herumgeführtwerden des Flügels beim Niederschlag muss eine Vergrösserung der Widerstandsflächen an den hinteren Theilen des Rumpfes entsprechen, eine constante oder eine vorübergehende, je nachdem jene erste Eigenthümlichkeit eine constante oder vorübergehende ist; eine Vermehrung der Schwanzfedern, namentlich aber Verlängerung derselben, ausgiebige vorübergehende Ausbreitung und Ventralablenkung, das alles vermehrt bleibend oder vorübergehend den pronirenden Einfluss des Rumpfwiderstandes.

Wir sehen wirklich, z. B. bei den langschwänzigen Elstern, eine besonders stark ausgeprägte radschaufelartige Niederbewegung der Flügel, an der Seite des Rumpfes, also eine besonders grosse Bewegung um die q-Axe.

So besteht zwischen der Beschaffenheit des Schwanzes und der Form der relativen Bewegung des Flügels, in Folge davon auch der Anordnung der Muskeln eine bemerkenswerthe Correlation. Es kommt auch der Widerstand, den der Flügel am Beginn der Hebung an seiner Dorsalfläche erfährt, in Betracht.

Es genügt natürlich, wenn periodisch das Gleichgewicht der drehenden Einflüsse der äusseren Kräfte um die q-Axe vorhanden ist.

Starke Vorführung des Flügels beim Niederschlag, ein ausgeprägtes radschaufelartiges Vornherumgreifen der Flügel, eine deutliche Circumductio, ein solches Verhalten muss naturgemäss, wenn nicht corrigirende Verhältnisse des Rumpfwiderstandes vorhanden sind, zu einer wirklichen Supination des Ganzen, ja unter Umständen zu einem vollständigen Ueberpurzeln führen.

So habe ich mitten in einem Schwarm von Tauben, die sich in der Morgensonne tummelten, ein Exemplar von Zeit zu Zeit sich rückwärts überschlagen sehen. Wollen Vögel z. B. zum Flug in die Höhe ihren Rumpf stärker supinatorisch aufrichten, so führen sie ihre Flügel besonders weit vorn und unten herum. Dies geschieht besonders deutlich, wenn sie mitten im Ruderfluge aus der absteigenden Bewegung rasch in eine aufsteigende übergehen. Hängt man einen Vogel in einer Jacke so auf, dass er zu sehr vorn über geneigt ist, so wird er mit den Flügeln sehr weit nach vorn ausgreifen um sich besser aufzurichten (s. pg. 61 und 82). Es bewirkt umgekehrt ein Flügelniederschlag mit stark adducirtem

Flügel eine stärkere Pronation des Ganzen und des Rumpfes. Sind nun auch die drehenden Einflüsse des Flügelwiderstandes auf die Gesammtmasse nicht immer in besonderer Stärke und Einseitigkeit thätig, so sind doch kleinere, schwankende Einflüsse dieser Art immer vorhanden. Sie reguliren und corrigiren sich dann gleichsam selbst, indem ihr Angriffspunkt im Mittel höher liegt, als der Gesammtschwerpunkt, indem jede wirklich erfolgende Drehung bewirkt, dass die im folgenden Momente nothwendigen äusseren Widerstandskräfte, die ja wesentlich dieselben sein sollen, ob nun das Ganze mehr oder weniger gedreht ist, in einem kürzeren Abstand vom Gelenke wirken, da ja die Drehung so erfolgt, dass der Angriffspunkt des Widerstandes relativ zum Gesammtschwerpunkt nach oben oder nach oben vorn geht, resp. in seiner Abwärts-Rückwärtsbewegung mehr zurückbleibt. Dies ist der Umstand, welcher die tiefe Lage des Rumpfschwerpunktes mit Bezug auf das Schultergelenk und die Lage desselben hinter dem Schultergelenk als eine nützliche Einrichtung erscheinen lässt.

Die Thatsache ist von vielen Forschern erkannt, aber nicht immer auf die einfachste und correkteste Weise gedeutet worden.

Man hat gesagt: der Rumpf sei in den Gelenken oder am Gelenkende des humerus oder an dem Basalrande des Flügels aufgehängt. Richtiger ist es zu sagen: der Rumpf ist an den Stützpunkten der Flügel in der Luft aufgehängt, der Rumpfschwerpunkt liegt im Mittel tiefer als diese. Aber es ist auch wichtig, dass er nach hinten von ihnen liegt, und statt dass man bloss den Rumpfschwerpunkt berücksichtigt, muss man den Gesammtschwerpunkt ins Auge fassen, der nun freilich gerade dadurch möglichst weit nach hinten und unten vom Flügelschwerpunkt verlegt wird, dass der Rumpfschwerpunkt von dem Gelenk nach dieser Richtung hin weit entfernt ist, andererseits auch dadurch, dass die Excursion des Flügels nicht zu weit nach hinten unten ausgedehnt wird. Dadurch wird bewirkt, dass die Gesammtmasse gegenüber den hauptsächlich treibenden äusseren Kräften, nämlich dem Flügelwiderstande, und auch gegenüber der ganzen resultirenden Einwirkung sämmtlicher äusseren Kräfte im stabilen Gleichgewicht sich befindet, während mit Bezug auf einzelne kleinere äusseren Kräfte, z. B. den Rumpfwiderstand, solches nicht der Fall zu sein braucht und nicht der Fall ist.

ε. Rückblick und Hinweis auf weitere Ziele der Untersuchung.

Wir haben die Analyse der mechanischen Verhältnisse des Vogelfluges so weit durchgeführt oder doch die Mittel und Wege derselben so weit erläutert, als dies ohne Zuhülfenahme von physiologischen Hypothesen, einzig auf Grund einer genauen Kenntniss der Beschaffenheit des Flugapparates und der Form seiner Bewegung möglich ist. Jede Verbesserung unserer Kenntniss von den Gesetzen des Luftwiderstandes, jeder neue Beitrag für ein genaueres Verständniss der Form der Flugbewegung muss natürlich unseren Einblick in das Wechselspiel der inneren und äusseren Kräfte beim Flug in entsprechender Weise fördern.

Der Nutzen einer auf die angedeutete Weise durchgeführten Analyse ist nicht zu unterschätzen. Wir gewinnen durch sie die Möglichkeit, auch für nicht direkt in ihrer Thätigkeit zu verfolgende Flugmaschinen, welche sich durch periodische symmetrische Thätigkeit mit bestimmter Geschwindigkeit horizontal fortbewegen, die nothwendigen relativen Bewegungen der Maschine und weiterhin die in jedem Moment nothwendigen inneren Gelenkdrehkräfte in der ε Tangentenebene zu bestimmen: also für jeden Moment die Grösse einer bestimmten Kraft und Gegenkraft $G_{\mu tg}$ und $-G_{\mu tg}$ und die Linie ihrer Wirkung. Es ist dann zugleich die Grösse der thatsächlichen Verschiebung der Ansatzpunkte dieser Kraft gegeneinander bekannt, also die Grösse der von den Motoren der Maschine in jedem Moment am Schultergelenk resultirend zu leistenden äusseren Arbeit. Denn diese bleibt sich gleich, in welcher Weise auch die genannte resultirende Gelenkdrehkraft thatsächlich hervorgerufen sein mag. Was durch grössere Hebelarme an Spannung erspart wird, geht auf der andern Seite durch entsprechend grössere Excursion verloren.

Bestimmung der resultirend in jeder Phase von den Gelenkdrehkräften geleisteten äusseren Arbeit, das ist also das Resultat unserer bisherigen Untersuchung. Nichts liegt näher, als nun die Verhältnisse der Motoren ins Auge zu fassen, welche eine derartige Arbeit thatsächlich leisten, oder bei einer Flugmaschine von bestimmten Verhältnissen verwendet werden müssen: die Art ihrer Disposition, die Grösse ihrer Leistung, die nothwendigen Hülfsapparate zur Uebertragung der Arbeit und zur Speisung der Motoren, den zur Regulation der Bewegung noth-

wendigen Mechanismus, bei der organisirten Flugmaschine gleichzeitig auch noch den Nebenapparat zum Wiederersatz der abgenutzten Theile, das Gewicht aller dieser Theile, endlich das für andere Zwecke noch disponible Volum und Gewicht und die Grenzen der Ausführbarkeit einer derartigen Maschinerie durch die Natur oder durch die Technik.

Diese Fragen sind unzweifelhaft das letzte und wichtigste Ziel bei der Untersuchung der Flugbewegung, wichtig vielleicht für die Frage der Luftschifffahrt, ganz sicher aber für die Biologie.

Bei künstlichen Motoren giebt vielleicht die Erfahrung gewisse Anhaltspunkte dafür, wie sich der theoretisch berechnete Nutzeffekt eines Motors zu der Arbeit verhält, die er bei möglichst vortheilhafter Einfügung in einen Mechanismus thatsächlich zwischen zwei Punkten der Maschine in bestimmter Richtung zu leisten vermag, und auch das Gewicht des Motors, der Hülfs- und Nebenapparate lässt sich annähernd berechnen.

In wie weit die Techniker diese Verhältnisse a priori auf Grund der bekannten Eigenthümlichkeiten des Motors und der für jede einzelne Phase der Bewegung bekannten nothwendigen resultirenden Arbeit an einem bestimmten Punkt der Maschine zu berechnen vermögen, und in wie weit sie solches zu berechnen pflegen, kann ich nicht beurtheilen.

Jedenfalls ist bei nicht vollkommen Sachverständigen vielfach die Annahme verbreitet, dass durch Hülfe von Uebertragungen die Form der mechanischen Arbeit in beliebiger Weise umgeändert werden könne, Arbeit mit hoher Spannung und geringer Excursion in solche von grosser Excursion und geringer Spannung und umgekehrt. Man unterschätzt hier die praktischen Schwierigkeiten. Für jeden Motor giebt es ein günstigstes Verhältniss, bei welchem er das Maximum der Arbeit leistet, und dieses Verhältniss besteht in einer ganz bestimmten gesetzmässigen Abänderung der Excursionsgeschwindigkeit und der Spannung nach der Zeit. Die an irgend einem Angriffspunkt nothwendige Arbeit aber kann möglicherweise schon allein der Grösse nach in einem andern Verhältniss sich ändern. Schwungräder können zwar unter Umständen ermöglichen, dass der Motor unter günstigen Verhältnissen arbeitet, dass seine Arbeit sich aufspeichert und in beliebigen Quantitäten wieder abgegeben werden kann; aber dass sie auch zugleich in beliebig wechselnder Form abgegeben werden kann, solches würde sich ohne die kunstvollsten variabeln Steuerungen nicht zu gleicher Zeit erreichen lassen. Besondere Arbeitsammler aber und Steuerungs- oder Regulir-

apparate verzehren immer einen Theil der Leistung der Motoren und sind besonders da kaum anwendbar, wo das Gewicht der ganzen Maschine möglichst klein bleiben soll.

Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse bei den Muskeln. Die Theorie sagt, dass durch Abänderung des Hebelarms jede beliebige Abänderung der Form der Muskelarbeit möglich ist. Aber der Abstand eines Muskels vom Gelenk kann nun eben nicht von Moment zu Moment in jeder beliebigen Weise sich ändern. Es wäre deshalb wohl denkbar, dass die Muskeln bald unter günstigen, bald unter ungünstigeren Verhältnissen arbeiten.

A. Fick hat experimentell die Umstände zu ermitteln gesucht, unter denen ein Muskel im Verhältniss zum Stoffumsatz (Wärmeentwickelung) die grösste mechanische Arbeit leistet. Genauere theoretische Untersuchungen aber über die Bedingungen, von denen der grössere oder geringere Nutzeffekt der Muskelthätigkeit abhängt, und darüber, in wie weit an irgend einem Gelenk die Muskeln in dieser Beziehung günstig oder ungünstig angeordnet sein können, sind nicht angestellt worden.

Diese Fragen sollen im folgenden Haupttheil dieser Schrift diskutirt werden.

III.

Die nothwendige Menge und Vertheilung der Muskulatur.

A. Allgemeiner Theil.

1. Versuch Prechtl's, die Muskelkraft beim Flug zu bestimmen.

Ich will keine Geschichte der Dynamik des Fluges liefern, erinnere aber beiläufig an den bekannten, unglücklichen Versuch Borelli's, die beim Fliegen vom Vogel aufgewendete Muskelkraft zu schätzen [1]). Von den späteren Abhandlungen über diesen Gegenstand ist diejenige von Prechtl die anscheinend gründlichste; es mag genügen wenn wir uns mit ihr allein eingehender beschäftigen.

Prechtl [2]) hat für den normalen horizontalen Flug (den er als Normalflug bezeichnet) eine sehr einfache Relation aufgestellt: Nach ihm ist die Arbeitsleistung der Muskulatur, welche den Flügelniederschlag besorgt, der Arbeit gleich, welche der Flügel entgegen dem Luftwiderstand leistet, diese aber $= P \frac{1}{2} g \tau^2$ (wobei P das Gesammtgewicht und τ die Zeit der Flügelhebung bedeutet) oder, was dasselbe sei, gleich der Höhe, um welche der Körper während der Flügelhebung sinkt. Dabei macht Prechtl die Voraussetzung, dass die Hebung des Flügels ohne Widerstand der

---

[1]) Borelli, De motu animalium. Cap. XXII, prop. 193 u. 194. Man vergl. hierüber: Jos. E. Silberschlag, Schriften der Berl. Ges. Naturf. Freunde. 1774. Bd. II. pg. 214—270, ferner
Nik. Fuss, Nova acta soc. sc. imp. Petropol. T. XV. 1806. pg. 88 (Petersburger Denkschriften 1799),
Giraud-Teulon, l. c. pg. 27 und
Marey, La machine animale.

[2]) Prechtl, l. c. II. u. III. Cap. d. Mechanik d. Fluges, pg. 155 ff. u. XII. Cap. pg. 247 ff.

Luft erfolge und dass resultirend keine verticale Componente eines Luftwiderstandes am Rumpfe vorhanden sei. Wir wollen diese Voraussetzungen für einen Augenblick als richtig anerkennen.

Man muss sich nun vor Allem vergegenwärtigen, dass durch den Niederschlag des Flügels entgegen dem Widerstande der Luft in verticaler Richtung Arbeit geleistet wird, die in jedem kleinsten Zeittheilchen und für jedes Flächenstück durch das Produkt aus der Grösse der verticalen Componente des Widerstandes an diesem Flächenstück und dem in verticaler Richtung von ihm vertical abwärts zurückgelegten Wege gemessen wird. Es ist nun selbstverständlich, dass entsprechend der verticalen Arbeit, welche der Vogel durch den Flügel gegenüber dem auf seine Unterseite wirkenden Luftwiderstande leistet, und gleichzeitig mit dieser Arbeit eine Verminderung der nach unten gerichteten lebendigen Kräfte des Systems oder eine entsprechende Vermehrung der aufwärts gerichteten stattfinden, oder dass ein Zuwachs abwärts gerichteter lebendiger Kräfte gleichsam statu nascendi unterdrückt oder ein Verbrauch aufwärts gerichteter lebendiger Kräfte compensirt werden muss; kurzum, man muss annehmen, dass eine entsprechend grosse Gegenleistung am System nach oben erfolgt. So weit befinden wir uns wohl mit PRECHTL in Uebereinstimmung. Wie berechnet sich nun der Gewinn an aufwärts gerichteter Energie, welchen der Vogelkörper durch die vom Flügel am Luftwiderstand geleistete Arbeit erfährt? Würde der ganze Körper mit dem Flügel starr verbunden sich bewegen, also zu Anfang und Ende des Niederschlages die verticale Geschwindigkeit 0 haben, so würde der erwähnte Gewinn darin bestehen, dass das System vom Gewicht P eine bestimmte verticale Strecke h abwärts unter der Einwirkung der Schwere zurückgelegt hat, ohne einen Zuwachs an abwärts gerichteter lebendiger Kraft, der $= Ph$ sein müsste, zu erfahren.

In Wirklichkeit aber liegen die Verhältnisse des ganzen Systems anders.

Wir haben bereits in der Einleitung nachgewiesen, dass ein System, welches frei in der Luft der Schwere überlassen ist und nur periodisch, nach Unterbrechungen, stossweise durch eine vertical aufwärts gerichtete Kraft in dasselbe Niveau zurückgebracht wird, bei Beginn der Einwirkung dieser Kraft jeweilen in Abwärtsbewegung, am Ende der Einwirkung in Aufwärtsbewegung begriffen sein mus.

In Fig. 24 ist xX die Abscisse der Zeit, die Curve stellt

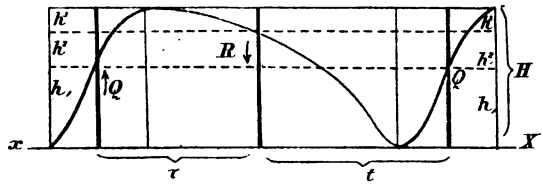


Fig. 24.

die verticale Oscillation des Gesammtschwerpunktes Σ des Vogels in der Zeit dar, t entspricht dem Flügelniederschlage, τ der Hebung; im Beginn von t findet sich der Gesammtschwerpunkt Σ in der Höhe $h_1 + h_2$ und hat die abwärts gerichtete Geschwindigkeit r oder die lebendige Kraft $R = \frac{1}{2}\frac{P}{g}.r^2$; am Ende von t ist Σ in der Höhe h_1 und hat die aufwärts gerichtete Geschwindigkeit q und die lebendige Kraft Q. Da in der Zeit τ nur die Schwere wirkt, so ist $Q = P(h_2 + h_3)$ und $R = P.h_3$. Der Gewinn an aufwärts gerichteter Energie, welchen das ganze System erfährt, besteht also:

Während Σ noch sinkt:

1. in der Annullirung der abwärts gerichteten lebendigen Kraft $R = Ph_3$
2. in der Annullirung des Zuwachses an abwärts gerichteter lebendiger Kraft, welche das System durch die Schwere erfahren muss, indem es in der Richtung ihrer Einwirkung um die Höhe $h_2 + h_1$ sinkt. Dieser Betrag $= P(h_1 + h_2)$

Während Σ steigt:

3. in der Ertheilung einer aufwärts gerichteten lebendigen Kraft $Q = P(h_3 + h_2)$ an das System,
4. in der Verschiebung des Ganzen entgegen der Schwere um die Höhe h_1 nach oben, wobei eine aufwärts gerichtete lebendige Kraft $= Ph.$ absorbirt wird.

Die ganze Leistung nach oben, welche allein der vom Flügel gegenüber der Luft geleisteten Arbeit A absolut gleichgesetzt werden kann:

$$= P(h_3 + h_1 + h_2 + h_3 + h_2 + h_1) = P.2(h_3 + h_2 + h_1).$$

und wenn $H = h_3 + h_2 + h_1$

$$A = P.2H$$

Diese Berechnung ist nur dann richtig, wenn der ganze Körper ohne Unterbrechung sinkt und ohne Unterbrechung steigt, was ohne grossen Fehler angenommen werden darf. Dasselbe Resultat

ergiebt sich unter derselben Bedingung für $Q > R$; ferner für den auf- oder absteigenden Normalflug, also ganz allgemein, wenn unter $2\,H$ die ganze absolute Länge des in verticaler Richtung pro Periode zurückgelegten Weges verstanden ist.

Fällt beim normalen horizontalen Flug der Hochstand von Σ in die Mitte der Hebung, so ist $R = Q = P.h_3 = P.\frac{1}{2}g\left(\frac{\tau}{2}\right)^2$, $h_2 = o$. Für $h_3 = h_1 = \frac{H}{2}$ ist dann absolut $A = 4\,P. = P.\frac{1}{2}g\left(\frac{\tau}{2}\right)^2$ $= P\,\frac{1}{2}g\,\tau^2$, was mit der Annahme von Prechtl stimmt. Diese Bedingung braucht aber durchaus nicht erfüllt zu sein. Prechtl selbst nimmt an, dass der Widerstand bis gegen das Ende des Niederschlages rasch und nur zuletzt etwas langsamer zunehme. Dann müsste der Tiefstand von Σ nah ans Ende von t fallen, ganz am Schluss von t würde Σ allerdings wieder im Steigen begriffen sein. In diesem Fall wäre $Q > R$, h_1 sehr klein und H nahe $= \frac{1}{2}g\,\tau^2$, also A nahezu $= P\,g\tau^2$. Prechtl ist allerdings der Meinung, dass bei seinen Voraussetzungen über den Widerstand der tiefste Stand des Rumpfes mit dem Beginn des Niederschlages zusammenfalle. Solches wäre nur annäherungsweise möglich, wenn fast der ganze Luftwiderstand im ersten Moment des Niederschlages entwickelt würde. Auch in diesem Falle müsste $A > P\frac{1}{2}\,g\tau^2$ sein.

Es wird kaum Jemand die Annahme Prechtl's als richtig vertheidigen wollen, dass die verticale Geschwindigkeit des Ganzen zu Beginn des Niederschlages $= 0$ sei. Aber auch wenn Prechtl zu Beginn des Niederschlages eine abwärts gerichtete lebendige Kraft $= R$ und zu Ende desselben eine aufwärts gerichtete $= Q$ angenommen hätte, so würde er und mit ihm mancher Andere sicher anders geschlossen haben, als es im Vorigen von mir geschehen ist. Es liegt ja nahe, den Gewinn an aufwärts gerichteter Energie, welchen das System erfährt, aus folgenden Posten zu berechnen:

1) der Vernichtung von $R = P.\,h_3$
2) der Zufuhr der kinetischen Energie $Q = P.\,(h_2 + h_3)$
3) dem Gewinn an potentieller Energie $= P.\,h_2$.

Summa $= 2.\,P\,(h_2 + h_3)$.

Diese Summe ist nun zwar unzweifelhaft das Mass der resultirenden Veränderung der dem Vogelkörper zukommenden verticalen Energie in der Zeit des Flügelniederschlages, aber nichts weniger als ein Mass für die in dieser Zeit vom Flügel gegenüber den Luftwiderständen geleistete Arbeit. Es liegt hier eine principielle

Frage vor, welche die grösste Bedeutung hat, z. B. für viele physiologische Versuche über die Arbeitsleistung des einzelnen Muskels und für die Theorie der oscillatorischen Bewegung überhaupt. Doch will ich dies in dieser Abhandlung nicht weiter ausführen, möchte vielmehr nur die prinzipielle Frage selbst der Prüfung der Fachmänner unterbreiten. Und nun kehre ich zu dem eigentlichen Gegenstand der Untersuchung zurück. So viel ist sicher: PRECHTL gründet den grössten Theil seiner mathemathischen Theorie des Fluges auf durchaus fehlerhafte Voraussetzungen, nämlich auf die Annahmen, dass die verticale Bewegung des Ganzen im Beginn des Flügelniederschlages = 0 sei, die ganze Hebung während einer Periode also $= h - h_1$, wobei unter h^1 die Höhe der Abwärtsbewegung während der Flügelhebung $= \frac{1}{2} g \tau^2$ verstanden ist, h also die Hebung während des Niederschlages bedeuten muss, was wieder der Annahme entspricht, dass auch zu Ende des Niederschlages die verticale Bewegung des Ganzen = 0 ist. Es wird dann die verticale Arbeit des Flügels gegenüber dem Luftwiderstand, es wird A gleich Ph gesetzt. PRECHTL muss dann weiter annehmen, dass beim normalen horizontalen Fluge $h = h^1$ ist, und gelangt auf diese Weise zu dem Schlusse, dass hier $A = P. \frac{1}{2} g \tau^2$ ist.

Nachdem diese sonderbaren Aufstellungen als unzulässig gekennzeichnet sind, fällt der grösste Theil des von PRECHTL aufgestellten Gebäudes, zunächst Alles, was über die verticalen Arbeiten gesagt ist, in sich zusammen. Es ist kaum mehr nothwendig, darauf hinzuweisen, dass auch die im Eingang dieses Kapitels erwähnten ersten Voraussetzungen PRECHTLS von dem gänzlichen Fehlen eines verticalen Widerstandes am Flügel bei der Hebung, und am Rumpf zu irgend einer Zeit der Periode unzulässig sind. Später werde ich Gelegenheit nehmen, zu zeigen, dass PRECHTL auch bei der Beurtheilung der Wirkung des Flügelschlages zur Vorbewegung von gänzlich irrigen Grundlagen ausgegangen ist, so dass sich auch dieser Theil seiner Theorie durchaus unbrauchbar erweist.

Gesetzt nun aber, es sei gelungen, zwischen der vom Flügel allein, beim Niederschlage gegenüber dem Luftwiderstand vertical abwärts geleisteten Arbeit einerseits, verschiedenen bekannten Faktoren, dem Gewicht des Thieres, seiner Flügelfläche und Flügellänge, dem Schlagwinkel, der Zahl der Flügelschläge, dem Verhältnisse $\frac{t}{\tau}$, den verticalen Oscillationen etc. andererseits eine cor-

rekte Beziehung auszurechnen, gesetzt der Fall also, die Grösse A sei richtig bestimmt oder bestimmbar, so kann diese Grösse doch nicht ohne Weiteres, wie PRECHTL meint, der Muskelarbeit gleich oder proportional gesetzt werden.

Zwar ist für die Grösse der Muskelarbeit anscheinend gleichgültig, in welcher Weise die Muskeln disponirt und betheiligt sind. Aber es muss vor Allem berücksichtigt werden, dass neben der Arbeitsleistung in der verticalen und in der s-Richtung auch eine solche in der q-Richtung stattfindet, welche für das System nicht direkt nutzbar gemacht wird. Beim Niederschlage der Flügel zur Waagehalte werden die Lufttheilchen nicht bloss abwärts oder rückwärts, sondern auch nach aussen hin getrieben, beim Niederschlag aus der Horizontalebene dagegen einwärts. Beides stellt eine Arbeitsleistung dar, welche einen Mehraufwand von Mukselarbeit nothwendig macht, ohne dass sich daraus ein unmittelbarer Nutzen für die Bewegung des Ganzen ergiebt. Andererseits wird die Arbeit am Luftwiderstand nicht, wie PRECHTL meint, einzig von den Niederziehern des Flügels geleistet. Ich will ganz davon absehen, dass die Schwere den Rumpf unter Arbeitsleistung gegenüber einem verticalen Luftwiderstand abwärts treiben kann. Aber auch bei dem Niederschlage des Flügels selbst ist nicht bloss der Muskelzug, sondern auch das Gewicht des Flügels F oder, sagen wir es genauer, der auf ε entfallende Theil desselben F^1 betheiligt.

PRECHTL kommt freilich in dem VII. Capitel seiner Flugmechanik (l. c. pg. 217) auf sehr eigenthümliche Weise zu dem Schluss, dass der Antheil des Flügelgewichtes an der Widerstandsarbeit vernächlässigt werden könne.

Er setzt voraus, das der verticale Widerstand am Flügel beim Niederschlag gerade hinreiche, um im Mittel dem Gewicht des Flügels Gleichgewicht zu halten. Selbst wenn dies richtig wäre, so würde natürlich doch in der Richtung der Schwerebeschleunigung eine Verschiebung E des Flügels stattfinden, wobei nothwendig durch die Schwere ein Zuwachs an lebendiger Kraft $= F.^1 E$ zu Stande kommt, welcher dem Widerstand gegenüber verbraucht wird. $F.^1 E$ ist also der Antheil, welchen in diesem Falle die Schwere an der Widerstandsarbeit hat, nur der Rest kommt auf Rechnung des Muskels. Aber nun bedenke man, was geschieht, wenn beim Niederschlag der Flügelwiderstand im Mittel gerade dem Flügelgewicht Gleichgewicht hält, wie PRECHTL meint! Was bleibt dann von der Einwirkung des Widerstandes noch übrig, um

das Flügelgewicht während der Flügelhebung und um das Rumpfgewicht während der ganzen Periode zu tragen?

2. Plan der eigenen Untersuchung.

Dieser Hinweis auf die Theorie von PRECHTL möchte genügend sein, die von mir im Eingang zu dieser Schrift über sie geäusserte Meinung zu rechtfertigen. Man wird auch ohne Zweifel erkennen, dass der von mir im 2. Theil meiner Schrift eingeschlagene Weg zur Bestimmung der mechanischen Arbeit, welche in jedem einzelnen Moment der Periode von den inneren Kräften geleistet wird, der richtigere, vielleicht der allein richtige ist. Wenn die Kräftecurve der in die ε-Tangentenebene verlegten resultirenden inneren Kraft respective ihrer v-, z- und q-Componenten bekannt ist, ferner das in jedem Moment nothwendige Drehungsmoment parallel der ε-Tangentenebene um die Flügellängslinie, endlich die relative Excursion des Flügels zum Rumpf, so lassen sich daraus die in jedem Moment in den 3 Hauptrichtungen geschehenden Arbeiten dieser innern Kraft leicht berechnen. (Wir können dabei, wenn bis hier alles auf richtigen Grundlagen festgestellt worden ist, weiterhin die Arbeit zur Längsrotation des Flügels in vielen Fällen als eine geringe vernachlässigen). Wir sind dann aber in den Stand gesetzt, neben der zur Niederbewegung und Rückbewegung des Flügels nothwendigen Arbeit auch diejenige zur Hebung und Vorführung zu beurtheilen.

Man wird dieses Resultat unserer Untersuchung als ein erfreuliches bezeichnen dürfen. Ein ganz anderer und viel weniger strenger Massstab muss an die nachstehenden Erörterungen gelegt werden, die sich auf die Ermittelung folgender Verhältnisse beziehen:

1. Auf das Verhältniss der Muskelmenge des Thieres zu der beim Normalfluge geleisteten Muskelarbeit, oder zu dem Stoffumsatz.
2. Auf das Verhältniss des Stoffumsatzes in der Schultermuskulatur beim normalen Fluge zu der Muskelarbeit, so weit sie für die Muskeln selbst eine äussere ist.
3. Auf das Verhältniss der mechanischen oder äusseren Arbeit der Muskeln des Schultergelenkes zu der mechanischen Arbeit der gesammten Gelenkdrehkräfte an diesem Gelenk.
4. Auf das Verhältniss der Arbeit der Gelenkdrehkräfte zu der locomotorischen Leistung des ganzen Systems.

Hier stellen sich unüberwindliche Schwierigkeiten entgegen.

Mit Bezug auf den vierten Punkt nämlich ist zu berücksichtigen, dass die Ueberwindung der Reibung einen Mehraufwand von Gelenkdrehkräften nöthig machen muss, und dass andererseits bei der Hemmung der relativen Bewegungen zwischen Rumpf und Flügel, namentlich bei der Hemmung des Flügelniederschlages, passive Widerstände eine gewisse Rolle spielen können. Soweit dieselben ausserhalb der Muskeln gelegen sind, bewirken sie eine entsprechend grosse Ersparniss an Muskelspannung.

Wir sind nicht im Stande, diese beiden Einflüsse genauer zu beurtheilen und bei verschiedenen Flugthieren und Flugarten gegeneinander abzuschätzen, und müssen den Fehler begehen, sie bei den folgenden Erörterungen einfach zu vernachlässigen.

3. Verhältniss des Stoffumsatzes zu der äusseren Arbeit der Muskeln.

Die Grösse des Stoffumsatzes in einem thätigen Muskel ist bekanntlich nicht ohne Weiteres jederzeit der vom Muskel nach aussen geleisteten mechanischen Arbeit gleich oder proportional. Stets wird neben der mechanischen Arbeit Wärme producirt, und es muss das Verhältniss dieser beiden Aeusserungen des Processes im Muskel je nach Umständen ein sehr verschiedenes sein. Der Muskel kann ja z. B. auf das Stärkste angestrengt, der Stoffumumsatz in ihm kann sehr erheblich sein, während eine Verkürzung gar nicht eintritt, oder sogar eine Dehnung stattfindet, die vom Muskel geleistete äussere Arbeit also = 0 oder negativ ist.

Viel näher kommt man jedenfalls dem Wesen der Sache, wenn man bei gleicher mittlerer Länge der Muskeln ihren Stoffumsatz während bestimmter Zeit der in dieser Zeit producirten Wärme und diese der Spannung proportional setzt, welche in Folge der Behinderung der Contraction durch innere und äussere Widerstände entsteht, ferner aber der Zeit, während welcher diese Spannung andauert [1]).

---

[1]) In der That geht aus den Versuchen der Physiologen, insbesondere denjenigen Heidenhains hervor, dass der tetanisirte (andauernd maximal gereizte) Muskel in einer bestimmten Zeit um so mehr Wärme entwickelt und also auch einen um so grösseren Stoffumsatz zeigt, je stärker er gespannt ist. Aber es entsprach der grösseren Spannung auch zugleich eine grössere Dehnung des Muskels. Demnach könnte es noch zweifelhaft sein, ob auch für einen und denselben bestimmten Dehnungszustand eines Muskels, je nachdem

Die Grösse des Kräftefeldes der Muskelspannung pro Periode oder Secunde giebt dann ein Mass für die

---

durch grössere oder geringere Reizstärke (Reizfrequenz) eine grössere oder geringere Spannung erzeugt wird, Stoffverbrauch und entwickelte Wärmemenge pro Zeiteinheit entsprechend grösser oder geringer sind, und ob die Proportionalität zwischen Spannung und Stoffumsatz hier ebenso schön zu Tage tritt wie bei den Versuchen, in welchen der grösseren Spannung die grössere Dehnung entspricht. Die Untersuchungen über die Wärmeentwicklung bei der Einzelzuckung, soweit sie mir bekannt sind, geben darüber keine ganz sichere Entscheidung, indem zwar allerdings die entwickelte Wärmemenge bei derselben Verkürzung um so grösser ist, je grösser die Widerstände der Verkürzung oder in den einzelnen Längezuständen die Spannungen sind, andererseits aber auch die Dauer der Einwirkung dieser Spannungen eine grössere ist. Andere Versuche am tetanisirten Muskel haben nun unzweideutig dargethan, dass in Fällen, wo der Muskel mehr oder weniger ad maximum contrahirt ist, die Wärmemenge eine *geringere* ist, wenn er in einem stärker verkürzten Zustand einer bestimmten Last Gleichgewicht hält, als wenn er dies bei etwas weniger verkürztem Zustande thut. Hier entspricht also der geringeren Dehnung bei gleicher Spannung ein *geringerer* Stoffumsatz, und man versteht diese Erscheinung, wenn man sich vorstellt, dass der sehr stark verkürzte und gereizte Muskel in eine Art Starre verfällt, so dass die durch den Reiz entstehenden Verdichtungen sich nur langsam lösen; dabei muss natürlich der Stoffumsatz beschränkt sein. Für mittlere Muskellängen ist vielleicht das Maass der Dehnung auf die Grösse des Stoffumsatzes von keinem wessentlichen Einfluss, so dass jener hier wirklich bloss von der Spannung abhängen würde. Dies erscheint mir jetzt bei reiflicher Ueberlegung als das Wahrscheinlichere, während ich in meiner Abhandlung: Zur Kenntniss der functionellen Anpassung der quergestreiften Muskeln, Stuttgart 1883 darzuthun suchte, dass der Stoffumsatz im Muskel zwar der Spannung proportional, ausserdem aber der Dehnung (der relativen Länge) des Muskels annähernd umgekehrt proportional sei. Eine derartige Annahme ist ganz allgemein und wörtlich genommen mit den Befunden Heidenhains nicht wohl vereinbar. Ein geringer Einfluss des Dehnungszustandes auf den Stoffumsatz bei extremen Muskellängen ist dagegen vorderhand nicht mit Sicherheit auszuschliessen. Bei stark gedehnten Muskeln endlich spielt jedenfalls die Spannung der gedehnten Stützsubstanzen eine gewisse Rolle, sodass die contractilen Elemente einen geringeren Theil der Spannung zu übernehmen brauchen. Doch ist vielleicht andererseits in diesem Zustande die Löslichkeit der durch den Reiz entstandenen Verdichtungen eine grössere und der Stoffumsatz deswegen ein verhältnissmässig lebhafterer. Es ist wirklich nicht möglich, zur Zeit zu beurtheilen, in wie weit diese beiden Momente sich gegenseitig compensiren oder nicht.

Grösse des Stoffumsatzes pro Querschnitt. Der gesammte Stoffumsatz in der Zeiteinheit hängt ausserdem ab von der mittleren oder natürlichen Länge des Muskels, und auch aus diesem Grunde muss er sich je nach Umständen ganz anders verhalten wie die mechanische Arbeit des Muskels. Ist σ die Spannung in einem bestimmten kleinen Zeittheilchen δ, ε die Muskelverkürzung, l die Muskellänge, so ist die Arbeit $= \sigma\varepsilon$. Der Stoffumsatz aber ist proportinal $\sigma l\delta$; je kleiner also die Muskellänge im Verhältniss zur Verkürzungsgeschwindigkeit des Muskels ist, desto sparsamer arbeitet der Muskel.

Jede Einschränkung der Muskellänge, welche ohne eine entsprechende Vermehrung der Muskelspannung effectuirt werden kann, ist also von einer Ersparniss im Stoffumsatz begleitet; zugleich aber auch von einer Ersparniss an Muskelmenge und Muskelgewicht, was bei einem fliegenden Thiere noch einen besondern Vortheil darstellt. Eine Verringerung des Muskelquerschnittes ohne eine entsprechende Vergrösserung der Länge ermöglicht zunächst innerhalb gewisser Grenzen keine erhebliche Verminderung des Stoffumsatzes: hat aber ebenfalls eine Verminderung des Muskelgewichtes zur Folge und ist jedenfalls aus diesem Grunde von Vortheil.

4. Wovon hängt nun die Länge eines Muskels und die Grösse seines Querschnittes ab?

Es müssen beim Vogel ganz dieselben Gesetze der funktionellen Anpassung Geltung haben, wie bei der quergestreiften Skeletmuskulatur anderer Thiere und des Menschen. Ich verweise in dieser Beziehung auf die beiden Abhandlungen von Roux [1]) und mir [2]), welche fast gleichzeitig erschienen sind und in vielen Punkten in erfreulicher Weise mit einander übereinstimmen.

Einer Muskelfaser von bestimmter Länge entspricht eine bebestimmte Grösse der durchschnittlichen activen Längenänderung, und einem bestimmten Querschnitt der Faser entspricht ein bestimmtes Mass der durchschnittlichen activen Spannung. Aendern

[1]) W. Roux, Beiträge zur Morphologie der functionellen Anpassung. 2. Ueber die Selbstregulation der morphologischen Länge der Skeletmuskeln. Jena 1883.

[2]) H. Strasser, Zur Kenntniss der funktionellen Anpassung der quergestreiften Muskeln. Stuttgart 1883.

sich die Ansprüche an die Längenänderung, werden z. B. grössere Excursionen der Muskelendpunkte gegeneinander gebräuchlich, so ist nunmehr für eine grössere Faserlänge oder wenn man will für eine weitere Anzahl von Längstheilchen Gelegenheit zur angemessenen Funktion gegeben. Und wirklich sieht man den Muskel länger werden, wahrscheinlich, wie Roux zu beweisen suchte, unter Vermehrung der Querscheiben.

Aehnlich verhält es sich mit dem Muskelquerschnitt; er vergrössert sich innerhalb gewisser Gränzen, wenn die Ansprüche an die Spannung zunehmen, unter Vermehrung der Fibrillenzahl pro Querschnitt u. s. w.

Ob das Längenwachsthum nur an vereinzelten Stellen, z. B. den Enden der Fasern stattfindet, oder in der ganzen Länge, ist bis jetzt nicht sicher festgestellt. Auch hinsichtlich des Dickenwachsthums ist Manches noch räthselhaft. Und so lange wir nicht genau wissen, wo im einzelnen Fall die Umänderung vor sich geht, wird der causale Zusammenhang zwischen ihr und der Aenderung der Funktion nicht vollständig aufgeklärt werden können.

So viel erscheint mir sicher zu sein, dass grössere Spannung sowohl als ausgiebigere Längenänderung zunächst durch verstärkte Nervenreizung erreicht wird. Es ist nun wohl möglich, wie Roux annimmt, dass der Reiz nicht allen Theilen der contractilen Substanz in gleichmässig verstärktem Masse zufliesst, sei es dass durch eigene nervöse Regulationsmechanismen, oder durch den verschieden geänderten Zustand des Muskels selbst Derartiges bewirkt wird.

Auf der anderen Seite ist es denkbar, dass die verbesserte Reizzufuhr ganz eben so gut den entwicklungsfähigen Substanzen geboten wird, welche neben den bis jetzt hauptsächlich funktionirenden liegen, als denjenigen, welche in Längsreihen derselben eingefügt sind, und dass es von anderen Verhältnissen als von denen des Reizes abhängt, ob die ersteren oder die letzteren weiter ausgebildet werden.

Wenn nun auch für den Fall, dass nur grössere Spannung, aber nicht eine Vergrösserung der Excursion nothwendig ist, durch quere Einschaltung neuer (d. h. weiter entwickelter) Theile die bis jetzt hauptsächlich fungirenden entlastet und in ihrem Bestande begünstigt werden, während die Einschaltung neuer Theile in die Längsreihen die Verhältnisse der alten Theile schädigt, so kann dies für sich allein doch noch nicht zur Folge haben, dass die letztgenannte Art der Einschaltung unterbleibt. Es müsste also gezeigt werden, dass trotz der allseitig verbesserten

Reizgelegenheit hier nur die quer eingeschaltete entwicklungsfähige contractile Substanz Gelegenheit hat, sich angemessen zu contrahiren und zu spannen, die längs eingeschaltete dagegen nicht. Und für den Fall, dass die Ansprüche an die Längenänderung grösser geworden ist, muss das Gegentheil nachweisbar sein. Hier liegt eine grosse Schwierigkeit vor, die meiner Meinung nach durch den Hinweis auf die allmähliche Verbreitung des Reizes in der Zeit nicht gehoben wird.

Nun habe ich nachzuweisen versucht, dass bei zu lang oder zu kurz gewordenen Sehnen eine Umzüchtung der Ansatzverhältnisse von Muskelfasern und Muskelfibrillen vor sich geht, indem bei den veränderten Funktionsverhältnissen Varietäten der Ansatzweise, die zuvor für die grössere oder geringere Leistungs- und Lebensfähigkeit der Fasern gleichgültig waren, grössere Bedeutung erlangen. Aehnliches wurde gelegentlich auch für die einzelnen Fibrillen geltend gemacht.

Nichts hindert anzunehmen, dass diesem Princip eine noch viel verbreitetere Wirksamkeit zukommt. Giebt es Fasern und Fibrillen, welche bei aussergewöhnlicher Dehnung des Muskels verhältnissmässig weniger gedehnt, und andere, die bei grosser Verkürzung weniger verkürzt sind, so kommen auch solche vor, welche beides zugleich sind. Diese Varietäten werden Bedeutung erlangen und bevorzugt sein, wenn zugleich sowohl die Ansprüche an die Verkürzungsfähigkeit, als auch diejenigen an eine Thätigkeit bei grösserer Dehnung gesteigert werden.

Eine Auslese zwischen Reihen contractiler Theilchen, welche wegen ihrer verschiedenen Lage zur passiven Stützsubstanz des Muskels, ihrer verschiedenen Länge und Wachsthumsintensität u. s. w. die geänderte Funktion verschieden gut leisten, besteht vielleicht auch noch innerhalb sehr kleiner resp. kurzer Abschnitte des Muskels. Specielle Untersuchungen müssen hierüber Aufschluss zu bringen suchen. —

Einen auslesenden und umgestaltenden Einfluss muss nun aber auch die Aenderung der mittleren Schnelligkeit der Verkürzung ausüben. (Der Muskel braucht dabei nicht häufiger oder mit grösserer Spannung als zuvor bei extremen Dehnungs- oder Verkürzungszuständen zu arbeiten). Es liegt vor Allem nahe, anzunehmen, dass die Zunahme der Verkürzungsgeschwindigkeit die Auszüchtung einer Muskelqualität bewirkt, welche die Fähigkeit einer rascheren Längenänderung besitzt. Es könnte nun aber in dieser Hinsicht

die Auswahl beschränkt, die Ausbildung einer neuen Qualität könnte sehr erschwert sein. Man frägt sich, ob in diesem Falle nicht auch eine Auslese zwischen verschieden langen Reihen contractiler Theilchen stattfinden könnte. Die relativ längeren, welche bei der Verkürzung des Muskels etwas weniger verkürzt, bei der Dehnung etwas weniger gedehnt werden, würden zwar deswegen allein noch nicht stärker bevorzugt werden — dem kleinen Vortheil halten vielleicht andere nachtheilige Verhältnisse das Gleichgewicht — wohl aber tritt Bevorzugung ein, wenn noch ein weiterer Vortheil hinzukommt: der Umstand, dass sie bei sehr grosser Verkürzungsgeschwindigkeit am wenigsten überanstrengt werden.

Es ist wunderbar, in welch' genauer Weise bei Muskelfasern, welche zwischen zwei starren Massen ausgespannt sind und sich bei den Excursionen derselben gegeneinander stets mehr oder weniger activ betheiligen, die Faserlängen den mittleren Excursionsgrössen ihrer Endpunkte gegeneinander proportional sind. Es handelt sich hier sicher um eine Regulation des Wachsthums durch die Funktion; aber man kann zweifelhaft darüber sein, ob die Empfindlichkeit der contractilen Elemente gegen Beanspruchung bei extremen Längezuständen, oder ob ihre Empfindlichkeit gegen zu langsame oder zu schnelle Längenänderung das Ausschlaggebende war, oder ob vielleicht beide Momente von Bedeutung gewesen sind. Letzteres scheint mir namentlich für die Aktion des stärker verkürzten Muskels in Frage zu kommen, weil gerade hier die Empfindlichkeit der Muskelsubstanz gegenüber unangemessen raschen Längenänderungen eine erhebliche sein muss.

Man darf nicht hiergegen einwenden, dass an den verschiedenen Gelenken des menschlichen Körpers trotz der verschiedenen Winkelgeschwindigkeit, die in ihnen üblich ist, das Verhältniss der Faserlänge zu ihrer Excursion überall annähernd dasselbe sei. Denn erstens ist dies gar nicht genau, sondern nur annähernd der Fall; es hat bei bestimmten Gelenken oft die Beuge-Muskulatur ein anderes derartiges Verhältniss, einen andern „Verkürzungs- oder Excursionscoefficienten" als die Streck-Muskulatur, und auch die Muskeln verschiedener Gelenke verhalten sich in dieser Hinsicht verschieden.

Ein verschiedener Verkürzungscoefficient kann demnach sehr wohl, ebensogut wie eine verschiedene Fähigkeit zur raschen Verkürzung durch Anpassung an verschiedene Contractionsgeschwindigkeit entstanden sein.

Bekanntlich ist durch die Untersuchungen von RANVIER [1]) KRONECKER und STIRLING [2]) DANILEWSKY [3]) und GRÜTZNER [4]) der Beweis erbracht worden, dass in demselben Organismus, an demselben Gelenk, ja z. Th. in demselben Muskel Muskelfasern oder Substanzen von verschiedener Qualität vorkommen, die einen mit langsamer Verkürzungsfähigkeit begabt, die anderen durch grosse Raschheit der Contraction ausgezeichnet; erstere erschöpfen sich bei gleicher Reizung und Spannung langsam, diese schnell. Es kann wohl nicht bezweifelt werden, dass dieser wesentliche Unterschied auf einer verschiedenen Persistenzfähigkeit der einmal gebildeten Muskelverdichtungen beruht. Vieles spricht dafür, dass dieselbe überhaupt bei der Ermüdung und bei der maximalen Reizung des stark verkürzten Muskels eine grössere ist. Ihre Zunahme bewirkt, dass bei derselben Spannung in der Zeiteinheit der Stoffumsatz, der zum Wiederersatz der zerstörten Verdichtungen nothwendig ist, ein geringerer ist. Diese Verminderung der Löslichkeit der Verdichtungen, welche die Muskelsubstanz einem passiv gedehnten elastischen Körper ähnlicher macht, ist nothwendig zugleich mit einer Verminderung der Verkürzungsfähigkeit (insbes. der Verkürzungsgeschwindigkeit) verbunden und umgekehrt.

Ich habe schon in der Arbeit über die funktionelle Anpassung der Skeletmuskulatur die Annahme gemacht, dass die Grösse des Muskelquerschnittes sich nicht nach der mittleren Spannung bei der einmaligen Leistung, sondern nach der mittleren Spannung pro Zeiteinheit bei einer Periode anhaltender Aktion richte.

Solches lässt sich nur für Muskeln vertreten, welche wirklich längere Zeiten hindurch thätig sind, sodass die Ermüdung und Erholungsbedürftigkeit der Theilchen eine grosse Rolle spielt.

ROUX legt auf die zeitlichen Verhältnisse kein Gewicht. Nur gelegentlich (S. 53) führt er an, dass unter Umständen die häufigere Wiederholung derselben Kraftproduction eine Vergrösserung des

---

[1]) RANVIER. Archives de physiologie par Brown-Séquard. 1874 und Leçons d'anatomie générale sur le système musculaire. Paris 1880. p. 186.

[2]) Archiv f. Physiologie von du Bois-Reymond 1878. S. 1.

[3]) A. DANILEWSKY. Zeitschr. f. physiol. Chemie Bd. VII. 124. 1883 und Biolog. Centralblatt. IV. 1885. No. 23. pg. 726. (O. Nasse).

[4]) GRÜTZNER. Zur Anatomie und Physiologie der quergestreiften Muskeln. Recueil zoologique suisse. T. I. 1884. No. 4.

Muskelquerschnittes zur Folge haben müsse. Ich glaube aber, dass man bei Muskeln, welche längere Zeit thätig sind, geradezu die Beanspruchung der Elemente des Querschnittes nach dem Produkt aus der Spannung und der Zeit, während welcher sie anhält, oder nach der durchschnittlichen Spannung pro Zeiteinheit bemessen darf, und dass bei gleicher Muskelqualität der Querschnitt dieser Grösse angepasst sein wird.

Ist meine Vermuthung richtig, dass die Menge des Muskels in der einen oder anderen Weise der Excursionsgeschwindigkeit angepasst ist, dann hängt dieselbe ausserdem ab nicht von der Grösse des einmaligen Weges der Faserendpunkte gegeneinander bei der einzelnen Verkürzung, sondern von der Summe dieser Wege während einer bestimmten grösseren Zeiteinheit, in welcher der Muskel anhaltend thätig ist. (Excursionsgeschwindigkeit).

Setzen wir den Fall, dass ein Muskel von bestimmten Querschnitt, der sich früher m mal pro Secunde jeweilen in der Zeit ϑ unter Leistung der mittleren Spannung σ zusammenzog, nun von einer bestimmten Zeit an nm Zusammenziehungen von derselben Ausgiebigkeit, jede bei derselben mittleren Spannung, aber jede in der Zeit $\frac{\vartheta}{n}$ vollführt, so ist kaum anzunehmen, dass dieser Muskel dabei in seinem Bau unverändert bleiben kann. Ich bin der Meinung, dass der Muskel sich den veränderten Ansprüchen und zwar unter Vergrösserung seiner Masse anpassen muss. Wahrscheinlich spielt in einem solchen Fall die Aenderung der Qualität die Hauptrolle. Wenn wirklich eine Substanz von n mal grösserer Contractionsgeschwindigkeit an die Stelle der ursprünglichen tritt, so wird der Stoffverbrauch (die Erschöpfbarheit) bei demselben Querschnitt ungefähr n mal grösser sein, es wird auch noch eine Anpassung der Muskeldicke nothwendig sein. Die ganze Muskelmenge wird wirklich ungefähr entsprechend der im Ganzen z. B. pro Stunde oder Tag geleisteten Arbeit zunehmen.

Wird aber die Anpassung an die grössere Raschheit der Contraction durch Verkleinerung des Verkürzungscoefficienten bewirkt, so nimmt die Länge der Fasern zu; der Querschnitt muss wesentlich gleich gross bleiben, und es erfährt also auch hier die Muskelmenge einen Zuwachs.

Aus den Untersuchungen von Danilewsky und Grützner geht hervor, dass in ein- und demselben Muskel zwei Faserarten von ganz verschiedener Qualität in einem bestimmten Mischungsverhältniss vorkommen können. Ein Muskel, bei dem x Quer-

schnittseinheiten von Fasern der Qualität A, y von solchen der Qualität B eingenommen sind, muss ungefähr zweien Muskeln entsprechen, von denen der eine bei länger dauernder Aktion die mittlere Spannung $x.s$ zugleich mit einer bestimmten Excursionsgeschwindigkeit φ zu leisten vermag, der andere gleich lange Zeit die Spannung $y \cdot \frac{s}{\varrho}$ bei der Excursionsgeschwindigkeit $\varphi \cdot \varrho$.

Man kann nun zeigen, dass ein Muskel, der gezwungen ist, abwechselnd Arbeiten von zwei sehr verschiedenen Formen zu leisten, dies mit grösserer Oeconomie an Stoffumsatz und mit geringerer Muskelmenge thun kann, wenn er aus zwei entsprechend verschiedenen Faserqualitäten zusammengesetzt ist, als wenn er dieselbe Qualität für beide Arbeitsformen benutzt.

Zusammenfassung.

1. Die Länge der Muskeln muss im Interesse der Oeconomie des Stoffumsatzes und einer möglichsten Leichtigkeit des Vogelkörpers möglichst klein sein.

2. Andererseits hängt die Länge des Muskelfasern ab von der Grösse der Excursion ihrer Endpunkte und wahrscheinlich auch von der Geschwindigkeit, mit welcher diese activ gegeneinander bewegt werden müssen, sofern nicht verschiedene Arten contractiler Substanz, die zu rascher Verkürzung ungleich gut geeignet sind, in Betracht kommen.

Was durch eine besser zu rascher Verkürzung geeignete Substanz an Länge erspart wird, stellt aller Wahrscheinlichkeit nach keine Reinersparniss an Muskelmenge dar, weil zu gleicher Zeit die Leistungsfähigkeit der Querschnittelemente eine geringere sein wird.

3. Wohl aber kann eine wirkliche Ersparniss an Muskelmenge und Stoffumsatz durch ein bestimmtes Verhalten der Form der Arbeitsleistung bewirkt sein.

Die Länge der Fasern kann bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit der Gesammtexcursion geringer sein, wenn die Geschwindigkeit in einer ganz bestimmten Weise abändert, so dass sie bei jedem Dehnungszustand des Muskels möglichst der zweckmässigsten Verkürzungsgeschwindigkeit für diesen Zustand entspricht. Vielleicht ändert sich diese etwas je nach der Spannung. Im Allgemeinen wird es von Vortheil sein, wenn die Geschwindigkeit der Excursion für mittlere Dehnungszustände möglichst gleichmässig

ist, oder nur allmählich zu- oder abnimmt, gegen das Ende der Contraction aber sich rasch verlangsamt.

4. Zeitweilige grössere Anforderungen an die Geschwindigkeit der Verkürzung sind dabei natürlich ganz gut möglich. Je häufiger sie vorkommen, desto besser wird der Muskel ihnen angepasst sein. Beim Vogel sind im Allgemeinen die Verhältnisse des normalen horizontalen Fluges für die Länge der Muskeln bestimmend. Doch dürfen wir aus den bekannten Verhältnissen dieser Flugart bei verschiedenen Flugthieren nur dann auf die Massen-Verhältnisse der Muskeln schliessen, wenn wir bei allen ein gleiches Verhältniss der aussergewöhnlichen Leistungen zu der Normalleistung voraussetzen. Einem häufigeren Vorkommen rascherer Bewegungen muss aber auch eine grössere Muskellänge oder bei besserer Verkürzungsqualität ein grösserer Querschnitt entsprechen.

5. Möglicherweise ist durch Zusammensetzung des Muskels aus Fasern von verschiedener Qualität erreicht, dass der Muskel Arbeiten von sehr verschiedener Form mit verhältnissmässig grosser Oeconomie leisten kann.

6. Bei Muskeln, welche längere Zeit hintereinander gebraucht werden, sind ceteris paribus die Querschnitte der Grösse der Spannung und der Dauer ihrer Wirkung oder also dem Kräftefeld der Spannung für eine bestimmte grössere Zeiteinheit angepasst. Ausserdem giebt es jedenfalls auch mit Bezug auf die Beanspruchung des Querschnittes bestimmte Verhältnisse der Abänderung der Spannung je nach der Ermüdung und der Dehnung der Theilchen, welche den Verhältnissen der Muskelsubstanz am besten conform sind. Vortheilhaft ist es z. B., wenn die Spannung nur allmählich mit der Zeit und nicht zu sehr ändert und wenn sie im Allgemeinen mit fortschreitender Verkürzung etwas abnimmt.

7. Wenn sämmtliche Muskeln der Spannung, die sie im Mittel bei längerer Action zu leisten haben, und der Excursionsgeschwindigkeit in gleich günstiger Weise angepasst sind, aber auch nur in diesem Fall, kann man ihre Masse den Arbeiten, welche sie in derselben Zeit (z. B. pro Tag oder Flugstunde) leisten, proportional setzen; es muss dann auch der gesammte Stoffumsatz zu der vom Muskel geleisteten äusseren Arbeit in einem ganz bestimmten günstigen Verhältnisse stehen und z. B. das Vierfache oder 3½fache derselben betragen.

8. Beim Fluge handelt es sich wirklich um Muskeln, welche

längere Zeit hindurch thätig sind. Ihre Masse kann aber, auch unter der Voraussetzung einer stets gleich öconomischen Verwendung, nur dann proportional der beim horizontalen Normalflug zu leistenden Arbeit sein, wenn sich die Ausdauer im Fluge stets gleich verhält, und wenn die Extraleistungen, zu denen das Thier befähigt ist, stets in demselben Verhältniss zu der beim Normalfluge nothwendigen Arbeit stehen.

Wir werden im Folgenden diese Annahme machen; denn es wird für die Beurtheilung der thatsächlichen, complicirteren Verhältnisse eine gute Grundlage gewonnen sein, wenn wir wissen, wie die Muskelmenge sich mit der Grösse des Apparates ändern muss bei ähnlich bleibender locomotorischer Leistung oder je nach der Fähigkeit, den normalen horizontalen Flug mit grösserer oder geringerer Geschwindigkeit auszuführen.

Zunächst aber ist noch zu untersuchen, ob wirklich die Organisation des Vogelkörpers den Muskeln der Schulter gestattet, überall möglichst öconomisch und insbesondere überall mit derselben Oeconomie zu arbeiten, und ob überhaupt an den Muskeln eines Gelenkes durch Umänderung der Längen, Dicken, Ansatzpunkte u. s. w. Derartiges erreicht werden kann. Eine allgemeine Behandlung dieser Frage bietet einige Schwierigkeiten.

5. Ueber den Grad und die natürlichen Grenzen der Oeconomie in den Anordnungsverhältnissen der Schultermuskulatur.

a. Die Aenderung der Richtung der resultirenden innern Gelenkdrehkraft in der Zeit.

Wie in dem 2. Theile dieser Arbeit nachgewiesen wurde, lässt sich in jedem Augenblick die ganze Wirkung der Gelenkdrehkräfte, soweit diese an sich Flügel und Rumpf gegeneinander bewegen können, ersetzen durch eine Kraft $G_{\mu tg}$ in der ε-Tangentenebene, deren Richtung im Punkte μ die geringste Entfernung von der Flügellängslinie hat und durch die entsprechende Gegenkraft. Die Grösse dieser Kraft, sowie ihr Abstand von ε ändert sich von Moment zu Moment; doch können wir uns vorstellen, dass dies stetig geschieht; es beschreibt dann der Punkt μ relativ zum Rumpf eine Curve, welche mit derjenigen, welche der Punkt ε beschreibt, um so besser übereinstimmt, je geringer die längsrotirende Wirkung der inneren Kräfte am Flügel ist (s. S. 152). Die Linie $o\mu$ aber beschreibt die Fläche eines Kegels im weiteren

Sinne des Wortes. Die Spitze des Kegels liegt in o, die Lichtung ist nach aussen gewendet.

Jeder Lage des Krafthebelarmes entspricht eine bestimmte Richtung von $G_{\mu tg}$, also eine bestimmte resultirende Kraftebene $oG_{\mu tg}$, welche sich mit der Sagittalebene (durch o oder durch μ) in einer ganz bestimmten sagittalen Richtung schneidet, welche der zv Projection von $G_{\mu tg}$ parallel ist. Wir haben nun allen Grund anzunehmen, dass die zv-Componente von $G_{\mu tg}$ bei gehobenem Flügel abwärts, bei ad maximum vorgeführtem Flügel abwärts rückwärts, bei ad maximum gesenktem Flügel rückwärts, vielleicht rückwärts aufwärts, bei der Hebung zuerst mehr direkt nach oben, dann mehr und mehr nach vorn, nach vorn unten und zuletzt nach unten gerichtet ist. Während der kurzen Zeit der Hebung ändert sich also die Richtung sehr rasch, um mehr als 180°, im ganzen Niederschlag dagegen um nicht viel mehr als 90°. Die Schnittlinie der Kraftebene $oG_{\mu tg}$ mit der Sagittalebene durch o ändert ihre Richtung in der genannten Weise und zwar stetig.

Man kann, um den Sinn der Veränderung zu veranschaulichen (Fig. 25), sämmtliche durch o gehende sagittale Richtungen in n

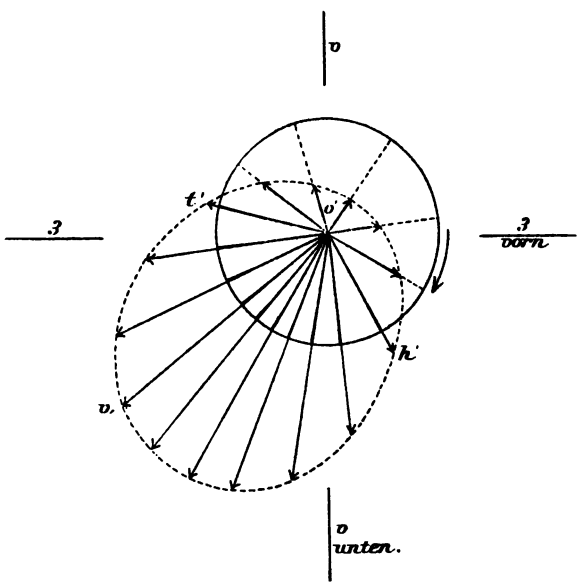


Fig. 25.

gleiche Gruppen eintheilen; es liegt dann die genannte Schnittlinie der Ebene der resultirenden Kraft mit der Sagittalebene

während einer gewissen Zeit innerhalb einer dieser Gruppen, und sie durchläuft im Verlaufe einer Periode sämmtliche n Gruppen.

In Fig. 25 entsprechen die Linien oh', ov', ot' verschiedenen aufeinanderfolgenden Richtungen dieser Schnittlinie der Kraftebene mit der Sagittalebene durch o, und die Grössen dieser Linien sind den jeweiligen Werthen von $G_{\mu tg}$ proportional. oh' entspricht dem Hochstand des Flügels, ov' der stärksten Vorführung, ot' dem Tiefstand u. s. w. Die Richtung der Umstellung ist durch den Pfeil bezeichnet, durch die Buchstaben o, u, v. h ist angedeutet, was in der Sagittalebene oben, unten, vorn und hinten ist. Auf Genauigkeit im Einzelnen macht diese Figur keinen Anspruch.

b. Umänderung der Lageverhältnisse irgend eines Muskels am Schultergelenk.

In Fig. 26 stelle u einen Ursprungspunkt eines Muskels dar, a seinen Ansatz am Flügel und va den wirklichen Hebelarm dieses Muskels.

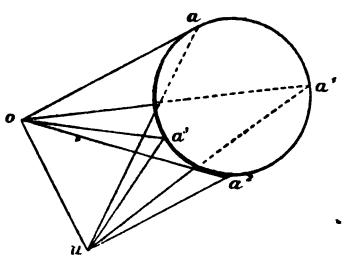


Fig. 26.

Wenn der Ansatzpunkt des Muskels annähernd mit der Längslinie des Flügels zusammenfällt, so beschreibt er eine rundliche Figur an der Oberfläche einer um den Schulterdrehpunkt gelegten Kugelfläche. Muskelansatzpunkte aber, welche weit entfernt von der Längslinie liegen, können wesentlich anders geformte Figuren beschreiben, als irgend ein Punkt der Flügellängslinie, namentlich wenn die pronatorischen und supinatorischen Drehungen des Flügels ausgiebig sind. Immer aber ist die Curve eine geschlossene.

Wir wollen zunächst annehmen, dass für jede Stellung des Flügels Muskeln vorhanden sind, deren Kraftebene mit der Ebene $oG_{\mu tg}$ genau zusammenfällt, und deren Verkürzung Flügel und Rumpf an sich in demselben Sinn gegeneinander bewegt, wie $G_{\mu tg}$. Diese Muskeln werden dann im Allgemeinen nur während sehr kurzer Zeit und nur einmal pro Periode in die genannte Lage versetzt sein. Es lässt sich nun zeigen, dass allemal eine Componente der Spannung verloren geht, wenn verschieden gerichtete Kräfte sich zur Erzeugung einer Resultirenden verbinden. Und wenn nun der Stoffumsatz im Muskel, sein Querschnitt und seine

Masse unter Anderem der Spannung und ihrer Dauer in der Zeit wirklich im Grossen und Ganzen proportional sind, erscheint es da nicht als das Vortheilhafteste, wenn wirklich jeder einzelne Muskel am Schultergelenk nur so lange activ betheiligt ist, als er in der Richtung der Ebene der resultirenden Kraft liegt?

Man wird freilich gleich bereit sein, hiergegen einzuwenden, dass zu einem solchen Verhalten nicht genügend Raum vorhanden ist, dass die Muskeln überflüssig lang sein müssten, während andererseits bei der Leistung einer Spannung durch verschieden gerichtete Muskeln das, was auf der einen Seite an Spannung mehr gebraucht wird, auf der anderen Seite mit einer Ersparniss an Muskellänge verknüpft ist. Damit erscheint vielleicht jede weitere Untersuchung des Gegenstandes überflüssig gemacht.

Ich meine nun aber doch, dass man suchen sollte, einen noch etwas klareren Einblick in die Verhältnisse zu bekommen.

Betrachten wir noch einmal die Fig. 25. Der Muskelansatzpunkt beschreibt die Curve $aa' a^2 a^3 \ldots$ und seine Kraftebene oau, $oa'u$ etc. dreht sich successive um die Linie ou als Axe hin und her. Der Ansatzpunkt u des Muskels liegt immer ausserhalb des vom Krafthebel beschriebenen Kegels, und es giebt daher für den Muskel im Allgemeinen pro Periode eine Zeit der stärksten Verlängerung und eine solche der stärksten Verkürzung (oder Zusammenfaltung?). Dies und die Geschwindigkeit der Bewegung seiner Ansatzpunkte gegeneinander ist unabhängig von dem Umstande, ob der Muskel während kürzerer oder längerer Zeit, für sich oder mit anderen activ gespannt ist.

Wenn man annimmt, dass die Länge eines Muskels einzig von der absoluten Grösse der Verschiebung seiner Endpunkte gegeneinander abhängt, so wird man dies dadurch allein erklären können, dass nicht blos neue Theile der Muskellänge zugefügt, sondern auch ein längeres Andauern und eine weitere räumliche Ausdehnung des Nervenreizes zu Stande gebracht wird, so lange und so weit überhaupt Gelegenheit zur massvollen Längenänderung der contraktilen Theilchen vorhanden ist. Daraus folgt dann, dass die absolute aktive Längenänderung des Muskels mit der Grösse der Annäherung seiner Ansatzpunkte gegeneinander im Allgemeinen identisch sein muss. Dass zur Erzeugung einer bestimmten resultirenden Spannung jeweilen viele verschieden gerichtete Muskelfaserzüge zusammenwirken, erscheint danach wohl als unumgänglich nothwendig, aber noch nicht als öconomisch.

Ganz ähnlich erscheint die Angelegenheit, wenn man die Länge

der Muskeln auch noch von der Geschwindigkeit der Annäherung der Muskelendpunkte gegeneinander abhängig sein lässt. Wenn das Verhältniss zwischen der Totalgrösse der gebräuchlichen Längenänderung der Muskelfasern und ihrer maximalen Geschwindigkeit sich ändert, muss meiner Meinung nach entweder die Qualität der Muskelsubstanz sich ändern — während der Excursionscoefficient gleichbleibt —, oder letztere Grösse ändert sich: bei rascherer Excursionsgeschwindigkeit und gleich bleibendem Totalbetrag der Excursion muss die Länge des Muskels eine grössere sein. Auch hier handelt es sich im Grunde wohl um eine Art Qualitätsveränderung. Neben und trotz alledem nun kann auch hier das soeben erörterte Princip von der Ausnützung der ganzen Excursionsgelegenheit für die Aktion noch Geltung haben.

Dass aber eine Betheiligung verschiedener Zugrichtungen bei einer einzigen resultirenden Zugrichtung nicht bloss unvermeidlich, sondern auch unter Umständen mit Ersparniss an Stoffumsatz und Muskelmenge verbunden ist, wird erst deutlich, wenn man die von uns auf S. 178 zusammengestellten allgemeinen Principien der Oeconomie in Betracht zieht.

Es wurde erörtert, wie ein Muskel im Stande ist, selbst einem grösseren Kräftefeld der Spannung pro Periode mit geringerem Querschnitt und geringerem Stoffumsatz pro Querschnitt auf die Dauer zu genügen, wenn nur die Vertheilung der Spannung auf die verschiedenen Phasen eine angemessen günstigere ist. Und solches ist hier der Fall. Wohl wird durch die gleichzeitige Betheiligung vieler Zugrichtungen die Summe sämmtlicher Kräftefelder der sämmtlichen betheiligten Fasern pro Periode eine grössere. Wohl wird durch dieselbe hinsichtlich der Längenverhältnisse der verschiedenen Fasern nichts Wesentliches geändert. Dafür aber erniedrigt sie das Maximum der gleichzeitigen Spannung jedes einzelnen Faserzuges um ein Vielfaches, während die Spannungen in den vorausgehenden und nachfolgenden Phasen der Thätigkeit erhöht und den maximalen Spannungen ähnlicher gemacht werden.

Es werden sich also mit Vortheil ebensowohl solche Zugrichtungen mit betheiligen können, die hinsichtlich ihres Ursprungs von der Ebene *oGμtg* abstehen, als solche, die es mit ihrem Ansatzpunkte thun.

Weiterhin lässt sich zeigen, dass die vom Rumpf zum Flügel gehenden Muskelzüge im Allgemeinen ihre günstigste Richtung parallel der resultirenden Kraftebene erreichen, bevor sie die Hälfte

ihrer Längenänderung durchmessen haben, insofern wenigstens die resultirende Zugrichtung sich bei den verschiedenen Stellungen der Flügellängslinie ungefähr so verhält, wie in Fig. 25 angenommen wurde.

Ferner folgt daraus, dass im Allgemeinen die Muskeln, bevor diese günstigste Richtung erreicht ist, beim Beginn der Verkürzung, den Flügel stärker, als der resultirenden Spannung $G\mu tg$ entspricht, gegen die q-Axe hinziehen und ihn nachher nach der entgegengesetzten Seite ablenken, dass für die auswärts ablenkende Wirkung jederzeit mehr Gruppen von Muskelfasern disponibel sind, und dass die ablenkenden Einwirkungen nach aussen durchschnittlich von der Resultirenden stärker divergiren, als die einwärts ablenkenden. Daraus folgt dann, dass jeder Muskel zur Zeit, wo er noch eine einwärts ablenkende Componente besitzt, also entsprechend dem stärkeren Dehnungszustand eine grössere Spannung haben kann. Seine Spannung kann also im Allgemeinen entsprechend der zunehmenden Verkürzung allmählich und zuletzt rasch abnehmen, wodurch der Modus seiner Spannungsänderung noch öconomischer gemacht wird. Dies Alles ist die nützliche Folge des Umstandes, dass die Flügellängslinie nicht direkt in einer Ebene bewegt, sondern von oben nach vorn, von da nach unten, hinten und wieder nach oben herumgeführt wird.

Ich will das erörterte Princip der Oeconomie nicht weiter ins Einzelne hinein verfolgen, auch nicht zu erörtern versuchen, wie eine solche Zweckmässigkeit entstehen kann. Wohl aber muss noch gezeigt werden, dass Oeconomie nur bis zu gewissen Grenzen der Vollkommenheit vorhanden sein kann. Es muss naturgemäss die Muskelmenge entsprechend den verschieden grossen Werthen von $G\mu tg$ für die verschiedenen Stellungen der Flügellängslinie an den verschiedenen Seiten des Schultergelenkes in verschiedener Mächtigkeit entwickelt sein. Durch Vermehrung der Zahl der annähernd parallelen Züge wird ja der einzelne besonders gut entlastet. Der Raum um das Schultergelenk herum ist nun aber naturgemäss ein beschränkter; beschränkt ist auch die Gelegenheit zur Festheftung an Rumpf und Flügel. Es müssen ferner nothwendig zu Zeiten Bezirke mit stark entwickelter Muskulatur, mit schwach entwickelten Nachbarparthien des Muskelkegels am Schultergelenk zusammenwirken, um eine mittlere Resultirende zu geben, wobei immer diejenigen Fasern, welche später von der

das Schultergelenk umkreisenden Reizwelle getroffen sind, die stärkeren Dehnungszustände und die einwärts gerichtete Ablenkungscomponente aufweisen. Hier kann das numerische Verhältniss zwischen den nach verschiedenen Seiten ziehenden Fasern je nach Umständen ein sehr verschiedenes sein, und in Folge davon wird in den einzelnen gedehnten Fasern die Spannung nicht immer in gleich günstigem Masse verstärkt, an den stärker verkürzten Fasern nicht immer in gleich günstiger Weise vermindert sein dürfen.

Der Abstand der Muskeln vom Gelenk ist im Allgemeinen ein geringerer als derjenige der ε-Tangentenebene; die Spannung muss also grösser, die Länge kann geringer sein, und es verhalten sich die verschiedenen Fasern hierin verschieden. Bliebe nun bei jeder einzelnen Faser der Abstand vom Gelenk (der theoretische Hebelarm) constant, so würde der Modus der Abänderung von Spannung und Excursionsgeschwindigkeit immer noch genau demselben Gesetze folgen, wie bei der resultirenden Kraft in der ε-Tangentenebene. Solches ist nun aber nicht möglich. Der Ansatzpunkt irgend einer Muskelfaser am Flügel bewegt sich in einer um den Schulterdrehpunkt gelegten Kugelfläche. Die gerade Verbindungslinie derselben mit einem bestimmten Punkte des Rumpfes muss nothwendig ihren Abstand vom Mittelpunkt bei der Drehung des Flügels von Moment zu Moment ändern und zwar je nach Umständen in verschiedener Weise.

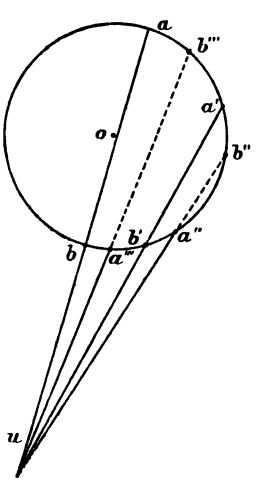


Fig. 27.

Im Allgemeinen schneidet sich die Zugrichtung der Muskelfaser mit jener Kugelfläche in dem Ansatzpunkt *a* und dann natürlich auch noch in einem zweiten Punkt *b* (Fig. 27). Erfolgt die Bewegung des Flügels im Sinn einer Bewegung gegen *b* hin, so rücken *a* und *b* gegeneinander, die Linie *uba* entfernt sich vom Drehpunkt. (Fig. 27 wenn *a* nach *a'*, *b* nach *b'* rückt). Das Umgekehrte ist der Fall, wenn die Drehung nach der andern Seite erfolgt (wenn z. B. *a''* nach *a'''*, *b''* nach *b'''* sich verschiebt).

In der Regel sind die Fasern des grossen Brustmuskels so

angeordnet, dass sich beim Niederschlage des Flügels ihr theoretischer Hebelarm vergrössert. Doch ist dies bei verschiedenen Arten in sehr verschiedenem Maasse der Fall.

Die Herren P. Reichel und E. Legal haben bei Gelegenheit ihrer Untersuchungen über die quantitativen Verhältnisse des Flugapparates der Vögel (siehe das Schlusscapitel dieser Schrift) auch diesem Verhältnisse ihre Aufmerksamkeit zugewendet. Es wurde zunächst bei verschiedenen todten Vögeln experimentell der Drehpunkt des Flügels im Schultergelenk für die Hebung und Senkung bestimmt. Dann wurde der Flügel in natürlicher, maximal ausgestreckter Stellung, ungefähr in der *qv*-Ebene des Schultergelenkes, in verschiedene Stellungen gebracht und der theoretische Hebelarm der mittelsten Fasern der grossen Brustmukeln gemessen. Derselbe wurde in allen Fällen = 1 gesetzt und die ganze Flügellänge jeweilen als ein Vielfaches dieser Grösse bestimmt.

Es ergab sich folgendes interessante Resultat:

Flügellänge.

(Die Länge des jeweiligen Krafthebelarms = 1 gesetzt.)

	Hebung v. 30° über die Horizontalebene.	Horizontalstellung.	Senkung v. 30° unter die Horizontalebene.
Numenius	74,8	46,6	28,5
Corvus corone	59	34	29
Archibuteo lagopus	52,5	31	24
Vanellus cristatus	33,3	32	26,3
Larus argentatus	35	29	23,7

Der Gedanke liegt nahe, dass es sich hier um die Realisirung desselben Principes handelt, welches von A. Fick bei der Construction seines „Arbeitssammlers“ verwendet worden ist. Beim Beginn des Flügelniederschlages sind die mächtigsten Muskeln der Schulter gedehnt; es ist grosse Fähigkeit zur Leistung von Spannung disponibel; die Winkelgeschwindigkeit des Flügels aber ist eine verhältnissmässig grosse; der verticale Luftwiderstand am Flügel ist noch klein, weil die Luft erst im Verlaufe des Niederschlages mehr und mehr verdichtet wird. Die allmähliche Vergrösserung des Hebelarmes ermöglicht es, beim Beginn des Niederschlages die Längenänderung des Muskels einzuschränken, sodass für die späteren Phasen des Niederschlages noch

eine grössere Verkürzungsfähigkeit disponibel ist. Die grosse Fähigkeit des gedehnten Muskels, Spannung zu entwickeln, wird dabei besser ausgenutzt. Diese Fähigkeit nimmt mit zunehmender Verkürzung ab; der Effekt der Spannung zur Beschleunigung der Drehbewegung wird durch die Verlängerung des Hebelarms möglichst constant erhalten oder gesteigert, was wieder nicht möglich wäre, wenn nicht für die späteren Theile des Niederschlages noch eine grössere Muskelverkürzungsfähigkeit disponibel wäre.

Sowohl die Abänderung der Spannung als diejenige der Excursionsgeschwindigkeit des Muskels wird also durch diese Einrichtung modificirt, offenbar in vortheilhafter Weise. Besonders bemerkenswerth ist dabei, dass diese Umformung nicht immer in derselben Weise vor sich geht.

Es wird das Ziel einer besonderen Untersuchung sein müssen, den Grund zu derartigen Verschiedenheiten im einzelnen Fall nachzuweisen.

Wir haben somit dargethan, dass Mittel vorhanden sind, um die Abänderung der Spannung und der Excursionsgeschwindigkeit der Muskeln zu reguliren. Diese Mittel sind der Natur der Sache nach beschränkt; schon allein durch die räumlichen Verhältnisse der Ursprungs- und Ansatzflächen. Sonach ist kaum daran zu zweifeln, dass nicht in allen natürlichen, durch Muskeln bewegten Flugapparaten die äussere Arbeit der Muskeln mit demselben Grade von Oeconomie geleistet wird. Das denkbar günstigste Verhältniss zwischen dieser Arbeit einerseits, dem Stoffumsatz und der Muskelmenge andererseits kann nur annäherungsweise, im einen Fall etwas besser als im andern erreicht sein.

6. Vorbemerkungen über das Verhältniss der Muskelarbeit zu der locomotorischen Leistung.

Das Hauptziel unserer Aufgabe ist die Ermittelung des Verhältnisses zwischen der nothwendigen Muskelmenge und dem nothwendigen Stoffumsatz einerseits, der locomotorischen Leistung andererseits. Wir wollen den Einfluss des Baues des Vogelkörpers, seiner Grösse und seines Gewichtes und der Besonderheiten in der Art seiner Bewegung auf dieses Verhältniss kennen lernen. Dabei machen wir die Voraussetzung, dass wirklich in allen Fällen die beim normalen horizontalen Fluge nothwendige äussere Muskelarbeit mit derselben Oeconomie des Stoffumsatzes geleistet wird, dass

also die Abänderung der Spannung und Excursionsgeschwindigkeit nach der Zeit an ihren einzelnen Elementen überall in derselben typischen und öconomischen Weise geschieht.

Dann ist sowohl der Stoffumsatz als die Muskelmenge proportional der Muskelarbeit, wie auf S. 179 und vorher dargethan wurde.

Die locomotorische Leistung muss dabei, damit sie mit der Stoffumsatzgrösse vergleichbar sei, als Funktion der Zeit definirt werden. Nichts liegt näher, als dass man unter der verticalen locomotorischen Leistung beim horizontalen Normalfluge die Ueberwindung der Einwirkung der Schwere auf das Flugthier versteht, oder die Grösse PT, wenn P das Gewicht des Thieres und T der ins Auge gefasste Zeitraum ist. Diese Leistung stellt also keine Arbeitsgrösse dar, sondern ein Kraftmoment, gemessen durch ein Kräftefeld. Nach ähnlichem Princip muss auch die locomotorische Leistung in horizontaler Richtung bemessen werden, nach dem Produkte aus der Zeit und der Kraft, welche der Bewegung des Thieres in horizontaler Richtung entgegenwirkt. Es kann sich hierbei nur um den Luftwiderstand handeln. In vielen Fällen wird es genügen, den fingirten Widerstand ins Auge zu fassen, den der Vogelkörper hervorrufen müsste, wenn er dasselbe Gewicht P und dielbe mittlere Horizontalgeschwindigkeit V hätte, aber in einen starren Körper von bestimmter Gestalt und Dichte verwandelt wäre. Dieser Widerstand müsste eine Funktion von $P^{2/3}$ und V^2, die locomotorische Leistung in der s-Richtung also $f(P^{2/3}. V^2. T)$ sein.

Den nöthigen Stoffumsatz, die nöthige Muskelmenge bemessen wir im einzelnen Fall nach der nöthigen Arbeit der Gelenkdrehkraft $G_{\mu tg}$. Und zwar begnügen wir uns damit, die Grösse ihrer verticalen und ihrer s-Componente einigermassen sicher und richtig zu beurtheilen. Die Arbeit in der q-Richtung steht ja dazu in einem ziemlich constanten Verhältniss, das wesentlich nur von der Grösse des verticalen und horizontalen Schlagwinkels abhängt. Ist dieser Schlagwinkel grösser, so geht auch ein verhältnissmässig grösserer Theil der Muskelarbeit für die locomotorische Leistung verloren.

B. Specieller Theil.

1. Der Einfluss der Anzahl der Flügelschläge und der Grösse des Schlagwinkels.

Wenn die Zahl n der Flügelschläge pro Secunde sich m mal vergrössert, und dabei doch die locomotorische Leistung des horizontalen Normalfluges in der v- und z-Richtung gleich bleibt, so muss der pro Periode in den beiden Richtungen erzeugte locomotorische Effekt m mal kleiner sein. Wir denken uns jede Periode in x Phasen eingetheilt und untersuchen zunächst, in wie weit es möglich ist, dass in jeder einzelnen bestimmten Phase der von den Oberflächen des Körpers erzeugte Widerstand (auf die Zeiteinheit berechnet) gleich bleibt, so dass dann, in Folge der m mal kürzeren Dauer der Phase, sein Kräftefeld in der letzteren wirklich m mal kleiner sein muss.

Solches kann offenbar am besten geschehen, wenn in den entsprechenden Phasen die Geschwindigkeit und Bewegungs-Richtung der verschiedenen Oberflächen und die Orientirung derselben übereinstimmend bleibt. (Der Bau des Apparates wird natürlich als gleichbleibend vorausgesetzt). Es müssten also die v-, z- und q-Componenten der Geschwindigkeit in entsprechenden Phasen gleich bleiben, die in diesen Richtungen zurückgelegten Wege m mal kleiner sein. Die Aenderung der Geschwindigkeit würde von Phase zu Phase gleich, dagegen für gleichen Fortschritt der Zeit m mal rascher erfolgen. Die resultirenden beschleunigenden Kräfte müssten also jeweilen (auf die Zeiteinheit berechnet) m mal grösser sein.

Solches ist nun in der That nicht genau und vollkommen möglich. Es könnten sehr wohl z. B. die z- und v-Componenten der Bewegung nach wie vor sich ähnlich ändern, so dass die Sagittalprojektion der Punkttrajektorien nur in den Dimensionen, nicht in der Form sich ändern würden, aber es kann in diesem Falle nicht zugleich die Abänderung der queren Geschwindigkeiten nach ähnlichem Gesetz, nur m mal so rasch in der Zeit erfolgen, weil dieselbe von den absoluten Werthen der sagittalen Excursionen, zugleich aber auch von den Winkelgeschwindigkeiten der relativen Bewegung abhängig sind. Da bei m maliger Verkleinerung der sagittalen Excursionen der Schlagwinkel kleiner sein, die Flügellängslinie durchschnittlich weniger stark mit der q-Richtung diver-

giren muss, so werden die q-Excursionen im Durchschnitt mehr als um das m fache vermindert.

Und wenn auch die Richtung der Sagittalprofile der Flügelflächen zu ihren Trajectorien und zugleich zur s-Richtung in entsprechenden Phasen dieselbe sein kann, so divergiren doch, wegen des kleineren Schlagwinkels, die längs zum Flügel gerichteten Linien dieser Flächen weniger mit der q-Richtung.

Man hat nun im Auge zu behalten, dass der resultirende Widerstand bei einer bestimmten Bewegung einer Fläche gegen die Luft nicht die Resultirende der Einzelwiderstände ist, welche die Fläche erzeugen würde, wenn sie die verschiedenen Componenten ihrer Bewegung einzeln ausführte, sondern von der Grösse der resultirenden Bewegung in der Richtung ihrer Normalen abhängt. Man kann aber diese Bewegung finden, wenn man berechnet, wie gross in Folge jeder einzelnen Bewegungscomponente die in die Normalrichtung entfallende Bewegung ist, und diese verschiedenen Beträge addirt.

Sind also b_v, b_z und b_q die Componenten der Bewegung in den 3 Hauptrichtungen, α, β und γ die Winkel der Normalen mit diesen 3 Richtungen, so ist $b_v \cdot \cos\alpha + b_z \cdot \cos\beta + b_q \cdot \cos\gamma$ die resultirende Bewegung in der Richtung der Normalen $= b_n$. Der Widerstand ist dann $= b_n^2 \cdot \zeta F$, wobei ζ einen ein für allemal für die Bewegung in der Luft und die verwendeten Masseinheiten zu bestimmenden Quotienten und F die Grösse der Flügelfläche bedeutet.

Es kann also unmöglich genau ähnlich wie zuvor, nur m mal so rasch in der Zeit, zugleich sowohl die s- als die v-Componente der Bewegung als auch der Widerstand nach Grösse und Richtung sich ändern. Kleine Modificationen im Modus der Abänderung müssen hier oder dort, oder vielleicht bei allen diesen Grössen stattfinden, ja wahrscheinlich auch in der Stellung der Sagittalprofile. Besonders gut corrigirend wirkt offenbar eine angemessene Verlangsamung der relativen Geschwindigkeit in den Extremlagen und eine etwas mehr als m-fache Verminderung der v- und s-Excursionen der Punkte des Flügels, stets vorausgesetzt, dass $m > 1$ ist, also eine wirkliche Vermehrung der Schlagfrequenz zu Stande kommt.

Für den Fall, dass die Modificationen klein sind, verkleinern sich also die relativen und absoluten Geschwindigkeiten entsprechender Theile in entsprechenden Phasen nicht erheblich, während die zurückgelegten Wege m mal kleiner sind; die v- und s-Componenten der

äusseren Widerstandskräfte an Rumpf und Flügel sind in entsprechenden Phasen ungefähr gleich gross, ebenso die Wirkung des Flügelgewichtes; die Ordinaten ihrer Curven bleiben also in entsprechenden Phasen gleich, die Abscissen sind m mal kürzer, ebenso die ganzen Kräftefelder pro Periode (vgl. Fig. 16 und 17). Bedenkt man nun, dass die resultirenden Kräfte m mal grösser sein müssen, um in m mal kürzeren Phasen die resultirenden Geschwindigkeiten um dieselbe absolute Grösse zu ändern, dass die Ordinaten ihrer Curven also m mal höher werden (während ihre Abscissen ebenfalls m mal kleiner sind), so folgt, dass die inneren Kräfte hinsichtlich ihrer Spannung sich ändern müssen.

Man kann Fig. 16 u. 17 benutzen, um dies genauer zu verfolgen. Man denke sich, dass die Abscissenaxe hier das eine Mal einer Zeit T, das andere Mal einer Zeit $T \cdot \frac{1}{m}$ entspricht. Im letzteren Falle muss die Curve der resultirenden Kräfte am Flügel oder am Rumpf überall m mal höhere Ordinaten bekommen, während diejenigen der Curven von F, R, W_{rv} und W_{fv} gleich bleiben. Man erkennt dann, dass die Abstände der resultirenden Kräftecurve von W_{fv} resp. W_{rv} oder die Ordinaten der Curve der inneren Kräfte sich nicht überall gleichmässig ändern. In Fig. 16 rückt z. B. für $m > 1$ der Schnittpunkt C nach links; das Mittelfeld der inneren Kräfte, welches also aufwärts auf den Flügel wirkenden Kräften entspricht, wird mehr als m mal grösser, die beiden seitlichen Felder, welche inneren Kräften entsprechen, die den Flügel niederziehen, vergrössern sich um weniger als das m fache. Und da der Antheil, den der Bewegungsaustausch im Gelenk an der Wirkung der inneren Kräfte hat, zum Theil von F und W_{fv}, zum Theil aber von der resultirenden Bewegung abhängt, so ändert sich auch der Antheil, der auf die Gelenkdrehkräfte in der ε-Tangentenebene entfällt, ähnlich wie die gesammte innere Kraft.

Der vertical aufwärts gerichtete Zug der Muskeln am Flügel muss also durchschnittlich um mehr als das m fache zunehmen, die verticale Spannung der Niederzieher des Flügels dagegen um weniger als das m fache vermehrt sein.

Dieser Vermehrung der Spannung steht gegenüber die Verminderung der Excursion der Muskeln, aber nicht eine wesentliche Verminderung ihrer Excursionsgeschwindigkeit, die ja in den entsprechenden Phasen beinahe gleich gross geblieben ist. Bleiben die Hebelarme der Muskeln

dieselben, und will man den Einfluss der Schlagfrequenz kennen für die Voraussetzung, dass in allen Fällen die Muskeln mit derselben Oeconomie der Länge und des Querschnittes arbeiten, so muss man, wie mir scheint, annehmen, dass die grössere Schlagfrequenz keine Ersparniss an Muskellänge mit sich bringt. Dem Nachtheil der grösseren Anforderungen an den Muskelquerschnitt, namentlich der Hebemuskeln, steht also als Vortheil nur gegenüber die Ersparniss an Muskelarbeit in der q-Richtung in Folge des kleineren Schlagwinkels.

Man kann den Grund dieser Zunahme der Anforderungen an die Muskelmenge darin sehen, dass 1) bei jedem Niederschlag dieselbe Abwärtsgeschwindigkeit des Flügels anullirt werden muss, der Widerstand aber um so weniger dazu beiträgt, je schneller die Anullirung zu Stande kommt; 2) der Flügel bei jeder Hebung dieselbe Aufwärtsgeschwindigkeit erhalten muss. Die hierauf bezügliche Arbeit nimmt jedenfalls mit der Häufigkeit der Hebung zu. Die Schwere aber trägt zu ihrer Anullirung um so weniger bei, je kürzer die Zeit ist, während welcher dieselbe sich vollziehen muss.

Man muss sich allerdings fragen, ob nicht diese Vernichtung der lebendigen Kraft am Ende des Niederschlages und im Beginn der Hebung zur passiven Dehnung der Flügelheber resp. der Flügelniederzieher dient, und ob diese Dehnungsarbeit nicht wieder zur Ersparniss von activen Kräften bei der Flügelhebung und beim Flügelniederschlage nutzbar gemacht wird.

Es kann natürlich kein Zweifel darüber herrschen, dass der passiv gedehnte Muskel, wenn er sich ungereizt wieder zusammenzieht, die an ihm geleistete Arbeit wieder zurückgiebt. Hier aber ist der Muskel während des Beginnes der Verkürzung und vielleicht auch schon während der Dehnung activ betheiligt. Es ist sicher, dass der gedehnte gereizte Muskel einer grösseren Arbeitsleistung fähig ist; ob er aber wirklich entsprechend der zu seiner Dehnung verbrauchten Arbeit sparsamer arbeitet, ist eine andere Frage. Auf jeden Fall aber müsste ein solches Verhältniss auch bei n Flügelschlägen ausgenutzt sein, und wenn nun durch Vermehrung der Zahl der Flügelschläge eine grössere Arbeit der Muskulatur zur Hemmung und Wiedereinleitung der Bewegung des Flügels nöthig wird, so steigen doch wohl damit unter allen Umständen die Anforderungen an den Querschnitt der Muskeln.

Eine Verminderung der Schlagfrequenz mit entsprechender Vergrösserung des Schlagwinkels ver-

bunden erlaubt also, wie sich aus dem Angeführten ergiebt, eine Ersparniss an Muskelmenge und Stoffumsatz. Doch giebt es eine Grenze, über die hinaus die Verlangsamung des Flügelschlages nicht mehr von Nutzen ist. Erstens ergiebt sich aus der Betrachtung der Curventafeln 16 u. 17, dass eine Verkleinerung sämmtlicher Ordinaten der resultirenden Kräftecurve um ein *m* faches von um so geringerem Einfluss auf die Verkleinerung der Ordinaten der Curve der inneren Kräfte ist, je flacher die Curve der resultirenden Kräfte bereits im Verhältniss zur Curve von Flügelwiderstand plus Schwere ist, andererseits aber wird der schädliche Einfluss einer Vergrösserung des Schlagwinkels um so bedeutender, bei der Verminderung der Zahl *n* der Flügelschläge um ein *m* faches, je grösser er bereits ist. Es giebt eine Grenze, wo Vortheil und Nachtheil sich die Wage halten müssen, und diese Grenze ist sicher unter allen Umständen sehr rasch erreicht, wenn einmal die Grösse des Schlagwinkels den Betrag 60°—90° überschritten hat.

2. Der Einfluss der Flügelform.

Man denke sich den Flügel eines horizontal und mit gleichmässigen Flügelschlägen dahinziehenden Vogels plötzlich in seiner Form so verändert, dass die Flügelfläche im Ganzen gleich gross bleibt, der Flügel aber länger und schmäler, oder kürzer und breiter wird, oder an der Spitze sich verschmälert, an der Basis verbreitert etc. Der Flügelschlag aber soll möglichst wie zuvor fortgesetzt werden, jedenfalls der locomotorische Effekt pro Sekunde derselbe bleiben. Setzen wir zunächst den einfachsten Fall, dass von *n* gleich breiten, quer zur Flügellängslinie verlaufenden Streifen, in welche wir uns den Flügel zerlegt denken, jeder um ein *m*faches länger und schmäler wird, also die ganze Flügellänge um ein *m*faches sich verkürzt. Es sind dann annäherungsweise auch die *n* gleich breiten von Sagittalprofilen begrenzten Streifen, in welche wir bei irgend einer Stellung den Flügel zerlegen können, um ein *m*faches, schmäler und länger als zuvor. Es besteht nun aber durchaus keine Schwierigkeit anzunehmen, dass die sich entsprechenden Streifen nach wie vor in gleich geformten Trajectorien sich bewegen, wenigstens in Trajectorien, deren Sagittalprojectionen gleich geblieben sind. Die Bewegung kann mit demselben Modus der Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung verlaufen, wie zuvor; die Neigung der Sagittalprofile zu ihren Trajectorien kann

an den entsprechenden Punkten der Trajectorien dieselbe sein. Die entsprechenden Theilpunkte der Flügellänge bewegen sich dann in derselben Weise wie zuvor, so weit es die z- und v-Richtung anbelangt. Die Bewegung in der queren Richtung und die Stellung der qv- und qz-Profile des Flügels aber muss in den sich entsprechenden Phasen eine etwas andere sein; denn wenn die gleichen Theilpunkte des Flügels dieselben verticalen Excursionen machen, so liegen sie doch dem Gelenk um ein $m$faches näher, der verticale Schlagwinkel muss annähernd m mal grösser geworden sein. Ebenso verhält es sich hinsichtlich des horizontalen Schlagwinkels. Wenn nun auch die Vergrösserung des letzteren mit sich bringt, dass nicht in jeder Phase sämmtliche n sagittale Streifen genau um das $m$fache verlängert oder verschmälert und genau gleich gross geblieben sind, ferner wegen der Zunahme der Divergenz der Flügelfläche mit der q-Richtung in sich entsprechenden Phasen des Flügelschlages die Bewegung der einzelnen Streifen gegen die Luft in etwas anderer Richtung erfolgt, wenn auch schon ohnedies mit der Aenderung des Schlagwinkels trotz der gleich bleibenden Verhältnisse der sagittalen Bewegungscomponenten eine Aenderung der Widerstandsverhältnisse verbunden sein muss (s. voriges Kapitel), so genügt doch eine verhältnissmässig geringe Modification der Bewegung, damit jeder der n Streifen in entsprechenden Phasen annähernd denselben z- und v-Widerstand erzeugt, wie zuvor. Der horizontale und verticale Schlagwinkel sind dann jedenfalls mindestens um das $m$fache vergrössert, die Excursionen entsprechender Theilpunkte der Flügellänge zum Rumpf haben sich absolut nicht bloss in der q-Componente, sondern auch in den Sagittalcomponenten etwas vergrössert, aber nur um ein Geringes. Die Vertheilung des Flügelgewichtes und Flügelwiderstandes auf die Punkte o und ε wird nicht wesentlich geändert. Die v- und z-Componenten der resultirenden Kräfte am Flügel und Rumpfschwerpunkt, sowie der gesammten inneren Kräfte an diesen Punkten und der Gelenkdrehkräfte in der ε-Tangentenebene bleiben wesentlich dieselben, auch die relativen Excursionen des Punktes ε oder μ zum Rumpfe; demnach auch die Muskelarbeit. Die Kraftmomente aller Kräfte am Flügel sind dann dieselben geblieben, der Trägheitshalbmesser des Flügels mit Bezug auf o-Axen und Längslinie ist um das $m$fache kürzer geworden, das Trägheitsmoment m mal kleiner. Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung können also wirklich jederzeit m mal grösser sein. Bleibt die absolute Entfernung der Muskeln vom Gelenk dieselbe,

so erscheinen die Ansatzpunkte der Muskeln relativ zur Länge des Flügels nach aussen verschoben, Querschnitt und Länge sind gleich geblieben. Aendern sich aber die Muskelhebelarme ähnlich wie die Flügellänge, so müssen die Muskelmassen absolut gegen das Gelenk zusammengedrängt sein; ihr Querschnitt muss grösser, die Länge kleiner geworden sein, oder es muss (bei schrägfasrigen Muskeln) eine Umlagerung der Fasern im Sinn einer grösseren Parallelstellung mit der Längsrichtung der Muskelkörper stattgefunden haben.

Nun ist aber in Wirklichkeit eine Vergrösserung des Schlagwinkels doch bei sonst gleichen Verhältnissen mit einem Mehraufwand von Muskelarbeit und Muskelmenge verknüpft und kann ohne grossen Nachtheil über eine gewisse Grenze nicht vermehrt werden; je kürzer und breiter relativ der Flügel ist, desto grösser der Kraftverlust, wobei zu berücksichtigen ist, dass ein Mehrgewicht der Muskulatur selbst wieder ein plus von Luftwiderstand bei derselben Horizontalgeschwindigkeit nothwendig macht. Wenn die Vergrösserung des Schlagwinkels eine gewisse Grenze erreicht hat, so wird eine weitere Vergrösserung der Winkelgeschwindigkeit (welche in Folge einer weiteren Verkürzung und Verbreiterung des Flügels nothwendig ist) besser durch Vermehrung der Zahl der Flügelschläge erzielt, und der hiermit verbundene Nachtheil ist genau derselbe, als ob bei gleich lang bleibendem Flügel eine Zunahme der Schlagfrequenz zugleich mit einer entsprechenden Verminderung des Schlagwinkels eintreten würde (s. voriges Kapitel).

Thatsächlich zeigen Vögel mit relativ kurzen und breiten Flügeln eine grössere Schlagfrequenz und eine grössere Muskelmasse, als gleich schwere Flieger von ähnlichem Flugvermögen und ähnlich grossen aber langen und schmalen Flügeln.

Aendert sich das Verhältniss der Flügelbreite an verschiedenen Stellen der Länge in verschiedener Weise, so complicirt sich der Vergleich.

Zunächst vertheilt sich in diesem Falle das Flügelgewicht und der Flügelwiderstand in etwas anderer Weise auf die Punkte o und ε. Sodann nimmt der Flügel, je nachdem er an der Basis oder an der Spitze breit ist, grösseren oder geringeren Antheil an den Bewegungen des Rumpfes gegen die Luft. Es würde zu weit führen, dies hier für verschiedene Verhätnisse der Rumpfoscillationen genauer zu erörtern. Im Grossen und Ganzen ist

natürlich auch hier wieder die Entfernung des Punktes ε von o von der grössten Bedeutung. Auch hier wächst bei gleich grosser Flügelfläche der Schlagwinkel oder die Schlagfrequenz, wenn $o\varepsilon$ kleiner wird u. s. w.

Der schädliche Einfluss einer Verkürzung und Verbreiterung des Flügels wird nun allerdings dadurch etwas gemindert, dass in Folge dieser Veränderung das Gewicht des Flügels um etwas vermindert werden kann.

Ein an der Basis verhältnissmässig mehr als an der Spitze verbreiteter Flügel und wohl auch ein breiter Flügel überhaupt bietet für die Umwandlung von horizontaler Geschwindigkeit in Auftrieb gewisse Vortheile und steht überhaupt mit bestimmten Besonderheiten der Flugweise im Zusammenhang, worüber später noch Einiges gesagt werden soll.

3. Der Einfluss der Grösse der Flügelfläche.

Wir setzen den Fall, dass an einem Vogel, der horizontal, mit gleichmässigen Flügelschlägen dahinzieht, die Flügel plötzlich m mal schmäler werden, während die Länge und das Gewicht gleich bleibt, auch sonst die Structur so zweckmässig ist, wie zuvor. Der horizontale Normalflug könnte nun in möglichst derselben Weise wie zuvor, mit derselben Horizontalgeschwindigkeit fortgesetzt werden, wenn die entsprechenden Nummern der x sagittalen Streifen, in welche man die Flügelfläche zerlegen kann, während der entsprechenden Phasen der gleich lang dauernden Perioden in derselben Richtung und Orientirung, wie zuvor, aber mit einer $\sqrt{m}$ mal grösseren Geschwindigkeit gegen die Luft gehen würden. Es bliebe dann Grösse und Richtung des Widerstandes in den entsprechenden Phasen unverändert. Es fragt sich, wie weit solches möglich ist.

Wenn der vom Flügel erzeugte Luftwiderstand eine Funktion einzig und allein der relativen Bewegnng des Flügels parallel der qv Ebene wäre, wie dies von Prechtl wirklich angenommen wird, dann würde die Beantwortung dieser Fragen sehr leicht sein. Eine Verschmälerung jedes Abschnittes der Flügellänge um das m fache würde durch eine $\sqrt{m}$ malige Vergrösserung der Winkelgeschwindigkeit in den sich entsprechenden Phasen der Periode compensirt werden können. Aber auch bei der genannten Voraussetzung ist eine solche Schlussfolgerung nur zulässig, wenn die Bewegung des Schulterdrehpunktes o in verticaler Richtung $= 0$ ist und wenn ausserdem die Sagittalprofile des Flügels stets sämmt-

lich horizontal gestellt sind. Ersteres kann für gewisse Fälle (kleine Flugthiere) als annähernd richtig zugegeben werden. Letzteres trifft für den Normalflug mit gleichförmiger mittlerer Horizontalgeschwindigkeit niemals zu. Der Flügel ist vielmehr bald pronirt, bald supinirt; es hat dann auch die Translationsbewegung des Flügels mit dem Ganzen eine Componente, welche in die Normalrichtung des Flügels oder einiger Theile der Flügelfläche entfällt; der Widerstand ist nicht bloss von der relativen Flügelbewegung abhängig. Bei der relativen Flügelbewegung aber kommt aus dem gleichen Grunde nicht bloss die verticale und quere Componente der Bewegung, sondern auch die s-Componente in Betracht. Es ist also genauer zu untersuchen, wie die absolute und relative Bewegung des Flügels sich ändern muss, damit letzterer trotz der Verkleinerung in jeder Phase denselben Widerstand (pro Zeiteinheit) nach Grösse und Richtung erzeugt.

Was die v und q-Componenten der Bewegung betrifft, so hängen dieselben bloss von der relativen Bewegung zwischen Rumpf und Flügel ab, sofern wir wenigstens den Einfluss der Oscillationen des Rumpfes auf die Bewegung des Flügels hierbei ausser Acht lassen. Es besteht kein Zweifel, dass diese Bewegungen in den entsprechenden Phasen durchschnittlich um ein $\sqrt{m}$ faches vermehrt werden und dabei im Modus ihrer Abänderung in geeigneter Weise modificirt werden können. Gelänge es, auch die s-Componenten der absoluten Bewegung um ein $\sqrt{m}$ faches in jeder Phase und an jedem Punkte des Flügels zu ändern, so würde die ganze absolute Bewegung der Fläche gegen die Luft um ein $\sqrt{m}$ faches in jeder Phase beschleunigt; es könnte bei $\sqrt{m}$ facher Vermehrung der Schlagfrequenz der horizontale und verticale Schlagwinkel beibehalten werden. Die Anforderungen an die Muskellänge würden um das $\sqrt{m}$ fache, diejenigen an den Querschnitt nicht ganz um das m fache wachsen. Man könnte dann leicht ermitteln, was geschehen muss, wenn die Grösse des Schlagwinkels statt der Schlagfrequenz vermehrt ist. Ist es nun wirklich möglich, auch die s-Componenten der absoluten Bewegung an jedem Punkt, in jeder Phase um das $\sqrt{m}$ fache zu beschleunigen? Daran ist nicht zu denken, indem die relative Bewegung der verschiedenenen Punkte des Flügels nicht in jeder beliebigen Weise gesteigert werden kann, sondern nur nach einem bestimmten gegenseitigen Verhältniss, da sie ja zu einem mehr oder weniger starren Ganzen verbunden sind.

Bezeichnen wir mit v die Translationsgeschwindigkeit des

Rumpfes, mit $\pm r_z$ die relative Bewegung eines Flügelpunktes zum Rumpf in der z-Richtung, so ist $v \pm r_z$ die absolute Bewegung nach vorn.

Wird $(v \pm r_z)$ zu $\sqrt{m}(v \pm r_z)$ geändert, so muss jetzt die relative Bewegung in der z-Richtung $= r'_z = \sqrt{m}(v \pm r_z) - v = \pm r_z \sqrt{m} \pm v$ $(\sqrt{m} - 1)$ sein. Die nothwendige Zunahme der relativen Bewegung ist eine mehr als $\sqrt{m}$fache, der letzte Ausdruck ist absolut $> r_z \sqrt{m}$, wenn r_z vorwärts gerichtet ist, also bei der Vorführung des Flügels; sie kann geringer sein, wenn r_z rückwärts gerichtet ist, also bei der Rückführung des Flügels. Aber je näher ein Punkt dem Gelenk liegt, desto kleiner ist r_z gegenüber v_z, desto mehr nähert sich also der Werth r'_z dem Betrag v $(\sqrt{m} - 1)$, mag nun die relative z-Excursion vor- oder rückwärts gerichtet sein. Durch keine Steigerung der Geschwindigkeit der relativen Bewegung, auch nicht unter Beihülfe der Einziehung der Schwinge, kann die geforderte Aenderung an allen Punkten des Flügels zu Stande gebracht werden. Hier wird also eine tiefer greifende Modification der Bewegungsform nothwendig. Vor Allem ist ersichtlich, dass eine Beschleunigung der relativen Bewegungen in der z-Richtung an der Spitze des Flügels die absolute z-Geschwindigkeit am meisten zu beeinflussen und zwar geradezu zu vermindern vermag. Wenn alle Punkte in $\sqrt{m}$fach kürzerer Zeit annähernd dieselbe verticale Oscillation beschreiben, so müssten bei gleich bleibender absoluter z-Geschwindigkeit die Trajectorien aller Punkte überall entsprechend steiler auf- oder absteigen. Wird aber bei der Vorführung des Flügels die absolute Geschwindigkeit vermehrt, bei der Rückführung verlangsamt, wie dies an der Flügelspitze der Fall sein kann, so werden die oberen Theile der Trajectorien gestreckter, die unteren steiler; das ermöglicht eine Vergrösserung der Pronationsstellung der Sagittalprofile an der Spitze des Flügels am Ende des Niederschlages, nöthigt vielleicht zu einer stärkeren Supination ebendaselbst im Beginn der Hebung und erlaubt eine bessere Horizontalstellung derselben bei der Vorführung des Flügels. Berücksichtigt man dies, so ergiebt sich, dass am Ende des Niederschlages die Bewegung in der Normalrichtung der Unterfläche viel stärker als um das $\sqrt{m}$fache beschleunigt werden kann, um so mehr, je weiter gegen die Flügelspitze die Oberflächenpunkte gelegen sind, zugleich kann die z-Componente des Widerstandes gegenüber der v-Componente begünstigt werden, während die relative z-Bewegung nicht mehr als um das $\sqrt{m}$fache zuzunehmen

braucht. Hier wird verhältnissmässig an relativer Bewegung gespart, ein grösserer z-Widerstand, vielleicht ein zu geringer v-Widerstand erzeugt, eine grössere innere Spannung in der z-Richtung, eine geringere in der Richtung aufwärts entwickelt. Dafür muss bei den hohen Lagen des Flügels ein grösserer verticaler Widerstand erzeugt werden; ein Theil der grossen Vorwärtsbeschleunigung kann in Auftrieb verwandelt werden durch relativ mehr als $\sqrt{m}$ fache Steigerung der Vorwärtsgeschwindigkeit des supinirten Flügels; eine solche Steigerung kann wesentlich nur an den äusseren Theilen in Betracht kommen; grössere Supination dieser Theile, oder eine Vermehrung der relativen Abwärtsgeschwindigkeit des Flügels im Beginn des Niederschlages kann zu Hülfe kommen.

Eine Steigerung sämmtlicher relativen Geschwindigkeiten um das $\sqrt{m}$ fache würde natürlich zur Folge haben, dass eine bebestimmte Reihe ähnlicher Formzustände in $\sqrt{m}$ mal kürzerer Zeit in Erscheinung treten, jede entsprechende Phase also $\sqrt{m}$ mal kürzer ist. In Folge davon müssen die Anforderungen an die Grösse der resultirenden Kräfte am Flügel überall um das m fache vermehrt sein, da die $\sqrt{m}$ mal grössere Veränderung der Geschwindigkeiten in der $\sqrt{m}$ mal kürzeren Zeit zu Stande gebracht werden muss; die Anforderungen an die Excursionsgeschwindigkeit der Muskeln würde um das $\sqrt{m}$ fache zunehmen. Die einer Periode entsprechenden Abscissen der Curven in Fig. 16 und 17 müssten $\sqrt{m}$ mal kürzer, oder mit $\sqrt{m}$ mal grösserer Masseinheit gemessen werden. Die Grösse des Widerstandes bleibt im Mittel ungefähr gleich gross. Die Ordinaten der Curve der resultirenden Kräfte werden im Durchschnitt m mal höher. Wäre dies auch an jeder einzelnen Stelle der Fall, so müssten die Kräftefelder der inneren Kräfte im Ganzen nicht ganz m mal grösser geworden sein.

In Wirklichkeit ändert sich nicht bloss die Vertheilung der Widerstände, sondern auch die Vergrösserung der resultirenden Kräfte ist nicht überall eine gleichmässige. Dies hat jedenfalls eine noch unregelmässigere Zunahme der inneren Kräfte und der Muskelspannungen zur Folge; vielleicht vermindert oder vermehrt sich dabei auch noch die Grösse der ganzen Kräftefelder der innneren Kräfte etwas. Es wird jedoch das, was durch die letztgenannten Umstände in dem einen Theil der Periode an Querschnittsbeanspruchung mehr oder weniger gefordert wird, in einem anderen Theil der Periode durch entgegengesetztes Verhalten wohl

ziemlich vollständig compensirt, oder einer Ersparniss an Querschnitt entspricht eine Mehranforderung an die Länge und umgekehrt. Dann würde mit der Verkleinerung des Flügels eine nicht ganz $m$fache Vermehrung der Ansprüche an die Muskelquerschnitte verbunden sein.

Es kommt nun aber ausserdem in Betracht ein im Mittel $\sqrt{m}$ mal schnellerer Ablauf der einzelnen Phasen, oder eines ganzen Flügelschlages von bestimmtem Schlagwinkel.

Wird letzterer nicht verändert, so muss die Schlagfrequenz entspechend zunehmen. Es ist klar, dass bei vermehrter Schlagfrequenz zwar die Dauer der einzelnen Phasen eine kürzere ist, dafür wiederholen sie sich aber entsprechend häufiger, so dass wir diesen Umstand bei Beurtheilung der Querschnittsbeanspruchung vernachlässigen konnten.

Die grössere Excursionsgeschwindigkeit macht aber unserer Ansicht nach eine entsprechend grössere Muskellänge und Muskelmenge nothwendig. Die Verkleinerung des Flügels würde also zur Folge haben:

1) Im Mittel eine nicht ganz $m$fache Vermehrung der Anforderungen an die Muskelmenge wegen der nöthig gewordenen grösseren Werthe von $G_{\mu tg}$.

2) eine annähernd $\sqrt{m}$fache Vermehrung der Muskelmenge wegen der grösseren relativen Excursionsgeschwindigkeit von ε.

Im Ganzen also eine mehr als $m$fache Zunahme der Muskulatur.

Man wird sich kaum vorstellen dürfen, dass die Qualität der Muskelsubstanz sich bei Aenderung der Verkürzungsgeschwindigkeit allzuleicht ändert. Wohl aber kann die Verkürzungsgeschwindigkeit in erster Linie so weit gesteigert werden, als die Gesammtexcursion (der Schlagwinkel) einer Vergrösserung fähig ist, insofern wenigstens für die grössere Gesammtexcursion nicht mehr Zeit in Anspruch genommen wird. So entwickelt sich mit der grösseren absoluten Geschwindigkeit, mit welcher die Muskelendpunkte gegeneinander rücken, eine grössere Faserlänge; Qualität und Verkürzungscoefficient der Muskelsubstanz aber bleiben zunächst im Wesentlichen unverändert. Erst wenn eine Vergrösserung der Gelenkexcursion aus andern Gründen mit zu grossen Nachtheilen verbunden ist, wird eine weitere Vergrösserung der Excursionsgeschwindigkeit zu tiefer greifenden Veränderungen der Qualität und eventuell zur Abänderung des Verkürzungscoefficienten führen.

Von diesem Gesichtspunkte aus versteht man, dass im Allgemeinen eine Verkleinerung des Schlagwinkels und eine Vergrösserung der Schlagfrequenz, so vortheilhaft sie in mancher Hinsicht erscheint, doch nur bis zu gewissen Grenzen mit wirklichem Nutzen ausgebildet werden kann.

Man wird sich aber auch nicht mehr darüber wundern, dass bei sonst gleichen Verhältnissen, aber verschiedener Grösse des Flügels, dem kleinen Flügel im Allgemeinen der grössere Schlagwinkel entspricht. In Folge davon braucht dann die Schlagfrequenz entsprechend weniger vergrössert zu sein.

Der Nachtheil eines relativ kleineren Flügels ist nun aber nicht so gross, als es nach dem Vorhergehenden scheinen möchte. Man darf nämlich nicht ausser Acht lassen, dass der kleinere Flügel auch zugleich der leichtere ist, der die kleinere Masse darstellt. Man denke sich die Verkleinerung zunächst als Verschmälerung, von n gleichen Längsstreifen des Flügels jeden m mal schmäler. Jeder Streifen erfährt dann durchschnittlich denselben Widerstand, beim kleinen wie beim grossen Flügel, befindet sich aber in m mal geringerer Entfernung vom Hauptbalken des Flügels. An Quer- und Längsschnitten ist die Abscheerungsbeanspruchung durch die Verkleinerung nicht geändert worden; da die Querschnitte kürzer geworden sind, die Längsschnitte aber dieselbe Länge behalten haben, so müsste der kleinere Flügel überall etwas, doch im Mittel nicht m mal dicker sein. Lässt man die Scheerungsbeanspruchung ausser Betracht, so muss wegen der Längsdurchbiegung der Flügel überall $\sqrt{m}$ mal dicker, wegen der Querdurchbiegung könnte er um ebenso viel mal dünner sein. Was zur Verstärkung der Längsverbindungen mehr an Material gebraucht wird, kann an den Querverbindungen erspart werden. Der gleich dicke, oder wegen der Abscheerungsverhältnisse kaum $\sqrt{m}$ mal dickere Flügel ist aber m mal schmäler, so dass er wohl Alles in Allem genommen mehr als $\sqrt{m}$ mal leichter sein kann.

Diesem Umstande entsprechend könnten nun die resultirenden Kräfte am Flügel jeder Zeit etwas mehr als $\sqrt{m}$ mal kleiner sein, während sie aus anderen Gründen, die oben erörtert wurden, nicht ganz m mal grösser sein müssen.

Wir wollen annehmen, dass diese beiden Einflüsse sich ungefähr das Gleichgewicht halten, der ganze Nachtheil des kleineren

Flügels also in der nothwenigen grösseren Excursionsgeschwindigkeit von ε besteht. Einem m mal kleineren Flügel würde also eine $\sqrt{m}$ mal grössere Muskelmenge entsprechen müssen.

Leicht gelingt es nun den Einfluss einer Verkleinerung der Flügelfläche zu beurtheilen, die mit Verkürzung des Flügels verbunden ist. Man beurtheilt zunächst den Einfluss einer gleich grossen Verkleinerung, welche bloss durch Verschmälerung zu Stande gebracht wird. Die im 2. Kapitel dargelegten Grundsätze geben dann Aufschluss über die neue Aenderung, welche durch Verbreiterung dieses Flügels hervorgerufen wird.

Der Nachtheil eines kleinen, die Vortheile eines grossen Flügels wären hiermit in erschöpfenderer Weise dargethan, als dies bis jetzt von irgend einer Seite geschehen ist. Es bleibt noch zu untersuchen, durch welche Umstände der Nutzen einer immer weiter gehenden relativen Vergrösserung des Flügels beschränkt wird.

Wir haben bis jetzt nicht berücksichtigt, dass die Schwere auf den kleineren und leichteren Flügel anders einwirkt, und dass die Bewegung des relativ schwereren Rumpfes durch innere und äussere Kräfte, und mit ihm diejenige der Flügelbasis eine wesentlich andere sein muss.

In der That kommt der geänderte Einfluss der Schwere nicht erheblich in Betracht, wenn es sich um die Verkleinerung eines bereits kleinen Flügels handelt; anders wäre die Sache, wenn die relative Flügelgrösse über eine gewisse Grenze hinaus vermehrt würde. Die damit nothwendig verbundene relative Verminderung des Rumpfgewichtes muss geradezu schädlich wirken. Man hat dabei zu berücksichtigen, dass bei Vergrösserung der Flügelfläche zwar die Excursionen um das $\sqrt{m}$ fache abnehmen können, bei gleich bleibendem Schlagwinkel. Die resultirenden inneren Kräfte bleiben dieselben, wenn die $\sqrt{m}$ fach geringere nothwendige Beschleunigung einen $\sqrt{m}$ mal grösseren Flügel treffen. Wenn nun die Masse des Rumpfes in stärkerem Grade vermindert wird, was mit zunehmender Vergrösserung des Flügels immer mehr der Fall ist, so müssen die relativen Oscillationen des Rumpfes immer grösser werden; sie beeinflussen die Bewegung des Fügels in ungünstiger Weise, indem seine basalen Theile in immer ausgedehnterem Maasse den Bewegungen des Rumpfes folgen.

Es müssen in Folge davon die relativen Excursionen des Flügels doch wieder verhältnissmässig gross sein. Auch folgt

daraus, dass immer mehr gerade die äusseren Theile des Flügels den hauptsächlichen Widerstand erzeugen müssen, was zur Folge haben wird, dass bei m facher Vergrösserung der Flügelfläche das Flügelgewicht verhältnissmässig stärker, mehr als um das $\sqrt{m}$ fache wachsen muss, so dass die resultirenden inneren Kräfte der ε-Tangentenebene doch etwas zunehmen müssen. Dabei ist vorausgesetzt, dass der Flügel seine nothwendige Festigkeit immer mit dem denkbar geringsten Aufwand an Material erreicht.

Ueberdies nimmt die Möglichkeit einer raschen Aenderung der Rotation des Flügels um quere Axen durch innere Kräfte, ohne schädliche Gegendrehung des Rumpfes, ab (s. pg. 98).

Alle diese Umstände machen verständlich, dass die relative Vergrösserung des Flügels nicht zu weit getrieben werden kann.

4. Das Verhältniss von $t : \tau$ und T.

Prechtl ist der Meinung, dass die geringste Arbeitsleistung beim Fluge eigentlich dann gegeben sein müsste, wenn $\tau = o$ ist: wenn der Vogelkörper während der Flügelhebung nicht sinkt, so braucht er durch den Niederschlag auch nicht gehoben zu werden. So absurd eine derartige Betrachtungsweise ist, so macht es doch andererseits einige Schwierigkeiten, zu erkennen, von welchen Verhältnissen die Grössen T, t und τ abhängig sind.

Man wird vor Allem gerade entgegengesetzt zu Prechtl festzuhalten haben, dass bei einer bestimmten gegebenen Einwirkung des Flügelniederschlages auf die Gesammtmasse die Länge der Hebung τ bestimmt ist oder nur innerhalb enger Grenzen schwanken kann. τ wird so lange dauern können, bis die Energie, welche resultirend dem System beim Niederschlag in der Richtung nach oben hinzugefügt wurde, durch die Einwirkung der Schwere und anderer äusserer Kräfte wieder vernichtet ist. Dieser Zeitraum τ wird etwas länger dauern, wenn das System während der Flügelhebung aufwärts gerichtete Luftwiderstände erzeugt. Abgesehen hiervon aber, hängt sie einzig von den Verhältnissen des Flügelniederschlages ab. Nach ihnen hat sich daher auch im Wesentlichen die Rückführung des Flügels zu richten: sie muss in der verfügbaren Zeit τ vollzogen werden. Die Zeit τ kann zwar in einem Fall kleiner, im anderen grösser sein, das Verhältniss $t : \tau$ kann sich ändern, während t gleich gross bleibt,

aber es müssen dann, wenn nicht die zeitlichen so doch andere Verhältnisse des Niederschlages geändert sein.

Wir wollen nun zunächst annehmen, dass der Luftwiderstand in der Zeit τ zum mindesten nicht am Flügel hebend einwirkt. Die Hebung des Flügels geschieht dann entgegen der Schwere durch innere Kräfte und zwar im Wesentlichen durch Gelenkdrehkräfte (Voraussetzung, dass die verticalen Oscillationen des Rumpfes unerheblich sind); wir wollen auch annehmen, dass es sich wesentlich um Muskelkräfte handelt. Die Hemmung der Aufwärtsbewegung des Flügels in der zweiten Hälfte der Periode geschieht durch die Schwere bei Abnahme der hebenden Muskelkräfte; unter Umständen aber müssen zum Schluss niederziehende Muskelkräfte mitwirken. Bei ähnlicher Aenderung der verticalen Geschwindigkeit des Flügels in den einander entsprechenden n Phasen von τ und bei ähnlicher Zu- und Abnahme der Spannung in den betheiligten Muskeln wird

a) die Beanspruchung des Querschnittes unter Anderem wegen ihrer zeitlichen Dauer proportional sein der Grösse τ;

b) die Excursionsgeschwindigkeit aber wird dieser Grösse umgekehrt proportional sein.

Auf Grund der unsern Betrachtungen zu Grunde gelegten Hypothese von der Bedeutung der Excursionsgeschwindigkeit würde der Schluss erlaubt sein, dass diese beiden Einflüsse sich gegenseitig Gleichgewicht halten hinsichtlich des Stoffumsatzes und der im Ganzen nöthigen Muskelmenge. Ausschlaggebend für diese Verhältnisse sind also hauptsächlich nur die Mittelwerthe und Maxima der nothwendigen Muskelspannungen ($G_{\mu tg}$). Wenn die Schwere allein die Hemmung des aufsteigenden Flügels übernimmt, so ist das Kräftefeld der verticalen Componenten von $G_{\mu tg}$ absolut gleich dem der Schwere; die mittlere Spannung gleich der Einwirkung der Schwere auf den Flügel (Fe). Je mehr aber zum Schluss niederziehende Kräfte wirken, desto grösser ist, ganz abgesehen von der Dauer, die mittlere Beanspruchung des Querschnittes der Hebemuskeln, und ausserdem kommt nun auch noch eine Inanspruchnahme der Niederzieher in Betracht. [1]).

[1]) Ausserdem hängt die Beanspruchung des Muskelquerschnittes aber noch ganz besonders von der maximalen Spannung ab, und diese wächst für die Hebemuskeln sowohl, als für die Niederzieher umgekehrt wie τ^2 (bei m mal grösserem τ und sonst gleichen Verhältnissen sind die resultirenden verticalen Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsänderungen des Flügels in ähnlich nummerirten, m mal

Wirken nun neben den inneren Kräften und der Schwere auch noch Luftwiderstände vertical auf den Flügel, so geschieht dies so, dass sie zu Anfang eher die Hebung hindern; am Schluss der Hebung aber wirken sie, wenn überhaupt, nach oben. Immerhin kann durch dieselben die mittlere Spannung der Flügelheber unter Umständen bedeutend entlastet werden.

Diese ihre Wirkung kann um so mehr und um so früher in der Zeit in Frage kommen, je länger τ, und je früher in der Periode die nöthige supinatorische Umstellung des Flügels vollzogen ist; je grösser ferner die Flügelfläche und ihre Supinationsstellung zum Trajectorium, und je kleiner die horizontale Geschwindigkeit des Ganzen.

Wir kommen also zu dem Schluss, dass eine Verkleinerung von τ, wie sie etwa mit einer Ermässigung der Gewalt des Niederschlages (bei gleich bleibendem Schlagwinkel) Hand in Hand gehen könnte, namentlich dann nachtheilig ist, wenn in Folge davon Muskelkräfte nothwendig werden, um den rasch emporgeschnellten Flügel rechtzeitig anzuhalten, und dass andererseits eine Vergrösserung von τ jedenfalls dann aufhört an und für sich vortheilhaft zu sein, wenn die Drachenwirkung des Flügels während der Hebung aus irgend einem Grunde nicht weiter gesteigert werden kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Drachenwirkung keinen absoluten Vortheil darstellt, sondern eine Umwandlung von horizontaler locomotorischer Leistung in verticale. (Darüber Näheres im Cap. 6).

Bei verhältnissmässig kleinem Flügel müssen im allgemeinen die relativen Excursionen schneller erfolgen, damit der genügende locomotorische Widerstand erzeugt werde. Da nun aber eine derartige Aenderung gerade auf die Drachenwirkung des Flügels bei der Hebung, die wesentlich von der absoluten Vorbewegung des Ganzen abhängt, nur wenig einwirkt, so ist an sich keine so grosse Nothwendigkeit vorhanden, dass auch die Hebung des Flügels rascher vollzogen wird. Dies wäre an sich wegen der kleineren Flügelfläche und geringeren Drachenwirkung trotz der geringeren Masse

---

grösseren Theilstücken von τ m mal kleiner, die resultirenden Kräfte also m^2mal kleiner). Für die Niederzieher kommt eine Erhöhung des Maximums bei sonst gleichen Verhältnissen nicht so sehr in Betracht, weil hier mit Bezug auf t Ueberfluss an Muskelquerschnitt vorhanden ist, wohl aber für die Hebemuskeln, die wesentlich nur bei τ funktioniren. Man hat aber zu berücksichtigen, dass hier das Prinzip des Arbeitssammlers benutzt sein könnte.

des Flügels nur nachtheilig. Man möchte deshalb vermuthen, dass hier die Schnelligkeit des Niederschlages womöglich nicht nur so weit gesteigert wird, dass entsprechend der Zeit t ebensoviel verticaler Luftwiderstand erzeugt wird, wie bei sonst gleichen Verhältnissen und grösserem Flügel, sondern noch mehr. Es braucht dann τ für denselben Schlagwinkel nicht so sehr kleiner zu werden; $\frac{\tau}{t}$ würde dann wachsen. Die auf S. 80 angeführten Messungen von MAREY über das Verhältniss von T, t und τ scheinen zu bestätigen, dass bei relativ kleinem Flügel die Dauer der Hebung weniger verkürzt ist, als diejenige des Niederschlages. Bei sehr grossen Flügeln möchte etwas Aehnliches, nur im entgegengesetzten Sinne Geltung haben.

Immerhin findet man, dass bei kleinen Flügeln auch die Hebung des Flügels noch unvortheilhaft genug vor sich geht; gerade hier zeigt sich die Hebemuskulatur besonders stark entwickelt, während bei sehr grossflügeligen Thieren, wo die Drachenwirkung des Flügels, ausserdem aber noch die grossen Rumpfoscillationen (durch die Gelenkaxenkräfte) zur Hebung des Flügels beitragen, die Hebemuskeln auffallend klein sind.

Kleine Thiere haben im Allgemeinen stärker entwickelte Flügelhebemuskeln, als grosse Flieger; dies hängt wohl damit zusammen, dass diese Thiere überhaupt mehr Muskulatur zu Extraleistungen, zur Erzeugung einer verhältnissmässig grossen Vorwärtsgeschwindigkeit, zum stationären Flug, Steigen u. s. w. zur Disposition haben, wie im Folgenden noch bewiesen werden soll. Sie steigern vielleicht die Horizontalgeschwindigkeit, indem sie bei der Hebung die supinirten Rückflächen der Flügel gegen die Luft schlagen; bei den angeführten übrigen Flugleistungen ist unter allen Umständen ein grösserer dorsaler Widerstand unvermeidlich.

5. Abhängigkeit der Muskelarbeit von der Geschwindigkeit der Bewegung des Ganzen gegenüber dem umgebenden Medium.

Bis jetzt haben wir erfahren, dass bei derselben locomotorischen Kraft die Grösse der aufzuwendenden Muskelarbeit je nach dem Bau und der Bewegungsform des Apparates verschieden ist. Jetzt müssen wir in's Auge fassen, dass bei derselben locomotorischen Kraft auch die Verhältnisse des äusseren Mediums und in Ab-

hängigkeit hiervon die Arbeitsansprüche verschieden sein können. Ich will dabei nicht den Einfluss der Dichte des Mediums, etwa die Verschiedenheiten des Fluges in dünner oder dichterer Luft in Betracht ziehen, sondern wesentlich nur die Geschwindigkeit, mit welcher sich der ganze Apparat im Mittel gegenüber dem Medium, oder dieses an dem Apparate vorbei bewegt.

Unserer Definition gemäss ist dieselbe locomotorische Kraft erforderlich, um einen Organismus mit einer Vorderfläche f und der Geschwindigkeit v oder einen solchen, dessen Vorderfläche $\frac{f}{n}$ ist, mit der Geschwindigkeit $v.\sqrt{n}$ gegen die Luft zu bewegen. Im ersten Fall aber ist die dazu nothwendige Arbeitsleistung, bei gleichem Bau des Apparates, eine geringere, weil das umgebende Medium sich mit geringerer Geschwindigkeit an dem Apparat vorbei bewegt und deshalb kleinere Excursionen der Flächen, welche denselben locomotorischen Widerstand erzeugen müssen, nothwendig sind. Keinem anderen Umstand als diesem ist zuzuschreiben, dass mehr Muskelarbeit erforderlich ist, um einen Körper vom Gewicht P mit gleichmässiger mittlerer Geschwindigkeit aufwärts zu bewegen, als um ihn in demselben Niveau zu erhalten. Wir können daher sehr wohl die Verhältnisse der horizontalen Fortbewegung durch diejenigen der verticalen, des Steigens und das Steigen durch die Verhältnisse der horizontalen Fortbewegung erläutern. Doch will ich mich hier auf wenige Bemerkungen beschränken.

Die Richtung der locomotorischen Kraft hängt jeweilen wesentlich von der Richtung der Sagittalprofile des Flügels und den Grössenverhältnissen der senkrecht dazu wirkenden Sagittalcomponenten des Widerstandes ab. Ihre durchschnittliche Richtung ist eine Mittelrichtung zwischen den verschiedenen Einzelrichtungen der Sagittalwiderstände, welche denjenigen Extremen näher liegt, die eine stärkere und länger dauernde Einwirkung des Widerstandes repräsentiren.

Warum liegen nun die Sagittalprofile nicht jeder Zeit senkrecht zu der Richtung der resultirend nothwendigen locomotorischen Kraft, und warum werden sie nicht, soweit die relative Bewegung in Betracht kommt, in dieser Richtung bewegt? Dies ist vor Allem bedingt durch die Combination der relativen Bewegung mit einer Bewegung des Ganzen.

In Fig. 28 seien $eo = m$, $e^1o = m^1$, $e^2o = m^2$, alles verschiedene Werthe für die Geschwindigkeit des Ganzen im Ver-

hältniss zur relativen Geschwindigkeit eines Punktes des Flügels. Der Radius r des Halbkreises sei das Mass der maximalen relativen Geschwindigkeit dieses bestimmten Punktes. Ist die relative Bewegung = op, so ist das resultirende Trajectorium = ep, e^1p, e^2p, u. s. w. Ist op^1 die Richtung der relativen Bewegung, so ist ep^1 resp. e^1p^1, e^2p^2 etc. das Trajectorium. Ist kk^1 die Richtung der locomotorischen Kraft, so ist die Bewegung der Fläche eine nützliche, wenn sie mit der von k abgewendeten Seite voran ihr Trajectorium durchmisst, also z. B. in den Stellungen, welche in Fig. 28 auf den Richtungen e^2p^1, e^1p^1 und ep durch kurze schräge Linien (weniger schräg als kk^1) angedeutet sind.

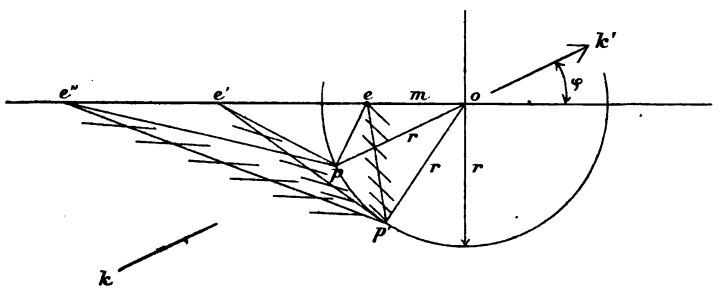


Fig. 28.

Es giebt für jeden Winkel φ und jedes Verhältniss von m zu r eine günstigste Richtung von r und von dem Sagittalprofil mit Bezug auf die Grösse der Widerstandscomponente, welche in die Richtung ok^1 entfällt. Nun ist an allen Punkten des Flügels die Richtung der relativen Bewegung im gleichen Moment jeweilen dieselbe, die Grösse verschieden; eine grössere Divergenz der Richtung des Flügelschlages mit der Richtung der Bewegung des Ganzen ermöglicht allen Punkten des Flügels, sich bei der Erzeugung des locomotorisch nützlichen Widerstandes zu betheiligen; es muss dann an den Punkten mit kleinerem r die Richtung des Sagittalprofils nothwendiger Weise mehr parallel zu m sein. Für die Stellungen der Sagittalprofile bleibt überhaupt umsomehr Spielraum, je grösser der Winkel φ ist (je näher an 90°) und je kleiner m gegenüber r; es kann dann die Widerstandsrichtung unter Umständen sowohl nach der einen als nach der anderen Seite von k^1 erheblich abweichen. Der Niederschlag kann sich hier nach den günstigsten Verhältnissen zur Rückbewegung richten. Wo aber (bei grossem m und kleinem φ) die mögliche Richtung

des Widerstandes beim Niederschlag nur in engen Grenzen variiren kann, muss der Rückschlag sich nach dem Niederschlag richten, damit die Wirkungen beider sich ergänzen können. Man erkennt auch leicht, dass die Vergrösserung von m um so früher ihre Grenzen haben muss, je kleiner φ, wenigstens wenn eine gleichförmige Bewegung bestehen soll; diese Grenze ist ferner um so eher erreicht, je grösser bei sonst gleichen Verhältnissen die Anforderungen an die locomotorische Kraft sind; deshalb z. B. bei der aufsteigenden Bewegung des Ganzen schon bei geringerem m, als bei horizontaler Bewegung.

Von der allergrössten Wirksamkeit ist natürlich bei zunehmender Grösse von m die möglichste Vergrösserung von r; sie erlaubt eine grössere Annäherung der relativen Bewegungsrichtung an kk^1, und der Richtung der Sagittalprofile an die zu kk^1 senkrechte Sagittalrichtung. Grösseres r ermöglicht eine Steigerung der maximalen Flugleistung, erfordert aber grössere Muskelmenge, oft in viel stärkerem Verhältniss. Es handelt sich aber wirklich oft weniger um möglichst sparsame Arbeitsleistung als vielmehr darum, den Flug bei einem möglichst grossen m überhaupt zu unterhalten, koste es was es wolle.

Aus diesen allgemeinen Grundsätzen erklären sich die Verschiedenheiten in der Richtung des Flügelschlages und der Sagittalprofile bei verschiedenen Arten des Fluges. Beim fast stationären Flug ist $m = o\,k$ aufwärts gerichtet, beim Beginn des horizontalen Fluges ist m klein, fast horizontal, φ ein spitzer Winkel, die locomotorische Kraft vorwärts aufwärts gerichtet. Bei raschem horizontalem Fluge ist φ vielleicht noch kleiner, m jedenfalls bedeutend grösser und horizontal; beim Steigen ist m um so kleiner, je steiler das Aufsteigen ist, aber natürlich dabei auch um so steiler aufwärts vorwärts gerichtet (φ um so kleiner).

Steigen.

Beim Steigen (vgl. pg. 82) richtet sich die Längsaxe des Körpers in die Richtung der resultirenden Bewegung, damit der Widerstand am Rumpf möglichst klein sei. Bei steilem Aufstieg, der besonders charakteristisch ist, fällt die Richtung der resultirenden locomotorischen Kraft mehr mit der Längsaxe des Thieres zusammen, bildet aber natürlich immer noch mit der Bewegungsrichtung m oben vorn einen spitzen Winkel (φ); m ist verhältnissmässig klein, trotzdem erfolgt der Flügelschlag nicht in einer Verticalebene, auch nicht in einer Querebene zum Rumpf, son-

dern relativ zum Rumpf von oben hinten nach unten vorn; die Trajectorien der Flügelspitze aber haben beim Niederschlag einen etwas mehr horizontalen, bei der Hebung einen mehr verticalen Verlauf (s. pg. 82). Weil aber m klein ist, besteht Spielraum für die Stellung der Sagittalprofile beim Niederschlag; an sich könnten sie sehr wohl unter Umständen pronirt sein; doch ist dies mit der Aufrichtung des Rumpfes wegen der beschränkten Möglichkeit der Pronation des Flügels im Schultergelenk nicht gut verträglich; es könnte aber, wenn nur die Verhältnisse von t in Betracht kämen, auf die Schrägstellung des Rumpfes verzichtet werden. Nun aber kommt noch in Betracht, dass der Flügel bei der Hebung steil und rasch emporgehen muss; hierbei den Widerstand möglichst klein zu halten, ist Hauptsache; daher möglichste Supination des Flügels, und daher Supination des Rumpfes, daher auch ist der Flügel beim Niederschlag im Ganzen supinirt. Es richtet sich also hier wirklich die Stellung der Sagittalprofile beim Niederschlage nach den Verhältnissen bei der Hebung.

Es giebt auch bei dieser Bewegung einen Moment, in welchem die Aufwärtsbewegung des Gesammtschwerpunktes zu wachsen beginnt, und einen zweiten, in welchem sie anfängt abzunehmen, und zwei andere Momente in der Periode, wo die Geschwindigkeit = der mittleren Aufwärtsgeschwindigkeit ist; letztere entsprechen dem Hoch- und Tiefstand des Gesammtschwerpunktes beim horizontalen normalen Flug; man kann sie als relativen Hoch- und Tiefstand, die Zeiten zwischen ihnen als Zeiten der relativen Senkung und Hebung des Ganzen bezeichnen; die relative Senkung wird für gewöhnlich auch annähernd eine absolute Senkung sein. Der nützliche verticale Widerstand muss bald nach Beginn der relativen Senkung und zwar verhältnissmässig rasch in seiner ganzen Wirkung entwickelt werden. (Vergl. S. 16).

Das Kräftefeld dieses Widerstandes ist natürlich sowohl im positiven als im negativen Theil erheblich grösser als beim normalen horizontalen Flug. In der z-Richtung sind zwar die Widerstände am Rumpf gering, am Flügel aber nach beiden Richtungen sehr beträchtlich, die Schwere wirkt nicht anders als beim horizontalen Flug. Der Flügel macht grössere Excursionen in kürzerer Zeit, die resultirenden Kräfte an ihm sind sowohl in der v- als in der z-Richtung vergrössert, die inneren Kräfte wegen der ebenfalls vergrösserten Widerstände natürlich noch um etwas mehr, ganz besonders gross aber ist die Excursionsgeschwindigkeit, vor Allem aus beim Niederschlag. Die ganze Muskelarbeit muss dem-

nach eine erheblich grössere sein, als beim normalen horizontalen Flug mit mittlerer Geschwindigkeit.

Beginn des horizontalen Fluges.

Auch hier wären an und für sich beim Niederschlag verschiedene Möglichkeiten der Bewegung sowohl hinsichtlich der Richtung des Schlages als der Stellung und Stellungsänderung der Sagittalprofile denkbar; dieselben vermindern sich, wenn bei der Bewegung des Flügels niemals der Hinterrand voran gegen die Luft gehen darf. Sodann sind die Verhältnisse der Hebung von Einfluss.

Stationärer Flug. Rütteln.

Hier ist ebenfalls der dorsale Widerstand am Flügel sehr gross und stark nach vorn gerichtet; beim Niederschlage muss dementsprechend eine sehr grosse verticale Widerstandscomponente entwickelt werden. Will das Thier seine horizontale Bewegung nicht beschleunigen, so erfolgt ausserdem der Niederschlag mit supinirten Sagittalprofilen, doch mehr direkt nach unten als beim Steigen. (Ueber den stationären Flug der Insecten s. Straus-Dürckheim und Marey). Beim Rütteln sind sicher die Anforderungen an die Muskulatur auch noch in Folge der Längsrotationen vermehrt, sowohl was die Spannungen als was die Verkürzungsgeschwindigkeiten betrifft. In der Regel sind bei den Vögeln die Einrichtungen der Flügelgelenke, des Flügels selbst und der Flugmuskeln dem stationären oder annähernd stationären Fluge wenig angepasst. Aus diesen Gründen ist die Arbeitsleistung hierbei eine sehr grosse, wahrscheinlich eine grössere als beim horizontalen Fluge mit mittlerer Geschwindigkeit. Dies muss um so mehr der Fall sein, wenn die von Marey hinsichtlich des Verhaltens des Luftwiderstandes (s. pag. 44) geltend gemachte Ansicht richtig ist. Die Thiere würden sich dann beim stationären Fluge so verhalten, als ob sie mit kleineren Flügeln gegen eine ebenso gut wie beim progressiven Fluge widerstehende Luft schlagen würden.

Einfluss der Geschwindigkeit beim horizontalen Normalflug.

Die vorausgegangenen allgemeinen Erörterungen lassen uns gut verstehen, warum der Flügel für gewöhnlich wesentlich in einer zur Fortbewegungsrichtung senkrechten Ebene hin und her

schlagen muss. Die locomotorische Kraft ist vorwärts aufwärts gerichtet. Die Bedingungen zur Entwicklung eines vorwärts gerichteten Widerstandes am Flügel sind bei horizontaler Bewegung des Ganzen um so ungünstiger, je kleiner r im Vergleich zu m, oder je gestreckter die Trajectorien verlaufen, sowohl beim Niederschlag an der Unterseite, als bei der Hebung an der Oberseite des Flügels. Daher kommen wesentlich nur die äusseren Theile des Flügels als Locomotionsorgan für die z-Richtung in Betracht.

Schon allein wegen seiner basalen Lagerung kann der Windfang unmöglich für die horizontale Beschleunigung von wesentlichem Belang sein, wie PRECHTL annimmt.

Es ist zur Zeit kaum möglich, genau zu beurtheilen, wie die Muskelarbeit mit der Steigerung der Vorwärtsgeschwindigkeit wächst. Man muss natürlich unterscheiden den Uebergang von einer geringeren Geschwindigkeit zu einer grösseren und den gleichförmigen Flug bei schon erreichter grösserer Geschwindigkeit. Eine Beschleunigung wird erzielt durch Vermehrung der relativen Excursionsgeschwindigkeit nach unten; dies kann bei gleichem Schlagwinkel unter Verminderung von t oder bei gleichbleibendem t unter vergrössertem Schlagwinkel geschehen. Dabei wird der absteigende Theil der Trajectorien steiler; die Pronation kann zunehmen, doch kaum in so starkem Massstab, dass nicht auch zugleich die verticale locomotorische Wirkung vermehrt wird.

Daraus erklärt sich, dass zur Beschleunigung der Horizontalgeschwindigkeit bei Verbleib in demselben horizontalen Niveau nicht bloss die verticale Excursionsgeschwindigkeit, sondern zugleich diejenige in der z-Richtung nach hinten vermehrt wird; dadurch wird der absteigende Theil der Trajectorien noch steiler und eine noch grössere Pronation erlaubt. Damit eine solche nun wirklich zu Stande kommt, muss der Flügel etwas eingezogen, das Ellbogengelenk muss gebeugt, der Vorderrand der vorderen Flughaut und des Handgelenkes entspannt, und dieses selbst stärker gebeugt sein. Ich bin aber der Meinung, dass die Aktion der Handgelenkbeuger selbst einen Theil der locomotorischen Mehrarbeit übernimmt[1]).

[1]) Wenn bei dieser Bewegung das Handgelenk genügend weit hinter das Schultergelenk gelangt ist, so kann der gebeugte Ellbogen mit Nutzen für den Vorstoss wieder gestreckt werden. Dass bei derselben Aktion zuerst die Beuger, dann die Strecker derselben (des Ellbogengelenkes) wirksam sind, darf nicht wundern.

Ich habe darauf hingewiesen (Ueber die Grundbedingungen der

Steigert sich auf diese Weise die horizontale Geschwindigkeit mehr und mehr, so werden bei derselben Geschwindigkeit der relativen Bewegung die Trajectorien allmählich gestreckter, die schädlichen Widerstände am Rumpf und am Flügel vermehren sich, die nützliche Excursion der pronirten Flächen des Flügels wird geringer, die Beschleunigung nimmt ab; es stellt sich ein Gleichgewichtszustand her. Schliesslich kann trotz aller Verschwendung von Nerven- und Muskelkraft die Geschwindigkeit der Muskelverkürzung nicht weiter gesteigert werden; das Maximum der horizontalen Geschwindigkeit ist erreicht [1]).

Nutzen langer Flügel. Die langen Flügel sind vor Allem grosse Flügel, welche ja überhaupt vortheilhaft sind. Es sind grosse und schmale Flügel. Die grössere Schmalheit giebt ihnen die Möglichkeit eines grösseren horizontalen Schlagwinkels, sie sind daher zu schnellem Vorwärtsfluge besonders geeignet. Meist ist an ihnen die Schwinge besonders schmal und lang, so dass die Vortheile einer Beugung und Lockerstellung des Handgelenkes einem grösseren Theile des Flügels zu gute kommen, zugleich aber die Beugung in ausgiebigerem Masse sowohl im Handgelenk als im Ellbogen vorgenommen werden kann.

Es möchte zum Schluss am Platze sein, die Grundlagen zu

---

activen Locomotion. Halle 1880 pg. 60), dass beim Sprung des Menschen am Kniegelenk des Actionsbeines ganz Aehnliches stattfindet; so lange der Fuss vor dem Hüftgelenk steht, wäre eine Aktion der Kniegelenkstrecker nur schädlich; es wirken daher nur 1) die Muskeln hinten am Hüftgelenk auf den Oberschenkel wie auf ein Ruder, das am oberen Ende des gebeugten Unterschenkels seinen Widerstandspunkt hat; die Tibia wird dabei der Länge nach zusammengedrückt und mit dem oberen Ende an sich nach hinten gedrängt. 2) Indem aber zugleich mit den eingelenkigen Muskeln der Hüfte die hinten am Hüft- und Kniegelenk vorbeiziehenden Muskeln sich zusammenziehen, was sich durch Beobachtung nachweisen lässt, wird das Kniegelenk nach vorn durchgedrückt und stärker gebeugt, wobei der Unterschenkel als Ruder wirkt, das seinen Widerstandspunkt am unteren Ende hat. Wenn aber die nach vorn getriebene Hüfte über den Fuss hinaus nach vorn gelangt ist, kann eine Streckung des Kniees mit Vortheil für die Aufwärts- und Vorwärtsbewegung beginnen.

[1]) Kleine Vögel, um eine möglichst grosse Horizontalgeschwindigkeit zu erlangen, fliegen in Wellenlinien, gewinnen Vorwärtsbeschleunigung (ohne Flügelschlag) durch das Abwärtsgleiten auf pronirten Flächen und vermindern den z-Widerstand durch Anlegen der Flügel. Nur an den tiefsten Stellen der Trajektorien erfolgt Flügelschlag, der u. a. auch die Supination des Ganzen bewerkstelligt.

prüfen, auf welchen PRECHTL seine mathematischen Formeln über die Wirkung des Flügelschlages zur Vorbewegung aufgebaut hat.

PRECHTL nimmt zunächst den Flügel als eben an, bezeichnet den Pronationswinkel seiner Sagittalprofile mit α, sucht nachzuweisen, dass der relative Niederschlag am besten in der Normalrichtung der Flügelfläche erfolgt (pg. 170). Er setzt voraus, dass die Winkelgeschwindigkeit eine gleichmässig beschleunigte sei, und bezeichnet die Endgeschwindigkeit im Widerstandspunkt mit C und die absolute Geschwindigkeit in der Richtung der Normalen mit $C - v.sin\alpha$, wenn v die Horizontalgeschwindigkeit des Ganzen bedeutet. Nun aber setzt PRECHTL für die Bewegung des ganzen Flügels die Bewegung einer im Widerstandspunkt concentrirt gedachten Flügelfläche, oder mit anderen Worten, er nimmt an, der Widerstand, der thatsächlich unter den genannten Voraussetzungen erzeugt wird, sei im Ganzen genau so gross, als ob alle Theile der Flügelfläche sich wie die im Widerstandspunkt gelegene Fläche gegen die Luft bewegen würden. Um diesen Punkt zu berechnen, berücksichtigt er nur die relative Bewegung des Flügels, was natürlich total unrichtig sein muss, selbst wenn für $v = 0$ eine derartige Betrachtungsweise zulässig wäre, da zwar die verticalen Geschwindigkeiten, aber nicht die horizontalen, also auch nicht (wenn $\alpha \gtrless 0$) die zur Flügelfläche normal verlaufenden Geschwindigkeiten im Drehpunkt $= 0$ sein und proportional der Entfernung vom Drehpunkt zunehmen können. Auch der Berechnung des genauen Werthes der reducirten Flügelfläche, welche nach PRECHTL dieselbe Wirkung zur Vorwärtsbewegung haben soll, wie der wirkliche Flügel, wenn sie jederzeit parallel und gleich wie die Fläche am Widerstandspunkt bewegt wird, liegen ähnliche irrige Annahmen zu Grunde, doch will ich darauf nicht näher eintreten (S. 173, 175 u. ff.). Gesetzt nun aber, die reducirte Flügelfläche Fo und die Geschwindigkeit der Bewegung des Widerstandspunktes wäre wirklich massgebend für den in der ε-Richtnng entwickelten Widerstand, so ist es doch höchst sonderbar und ungerechtfertigt, dass der zur Vorbewegung dienende Widerstand unter anderm dem Quadrate der Endgeschwindigkeit in der Normalrichtung des Flügels, also $(C - vsin\alpha)^2$ proportional gesetzt wird, was doch offenbar nur von dem maximalen, am Ende des Niederschlages entwickelten Widerstand angenommen werden kann, und dass nun im nächsten Moment dieser Wider-

stand dem an den Vordertheilen von Rumpf und Flügel entwickelten schädlichen Widerstand, der v^2 proportional ist, gleichgesetzt wird, ohne alle Berücksichtigung der verschiedenen Dauer der Einwirkung. Solches könnte doch nur verständlich sein, wenn der mittlere, vorwärts treibende Widerstand am Flügel gemeint ist den man sich gleichmässig und ohne Unterbrechung wirkend denkt (pg. 173 u. ff.). Es ist daher auch derjenige Abschnitt in PRECHTL's mathematischer Theorie, welcher sich auf die Verhältnisse der Vorwärtsbewegung bezieht, gänzlich unbrauchbar.

6. Aenderung der Verhältnisse des Rumpfes. Umwandlung von locomotorischer Kraft der z-Richtung in Auftrieb. (Drachenwirkung).

Bis jetzt haben wir den Verhältnissen des Rumpfes wenig Rechnung getragen; es wurde zugestanden, dass bei jeder Aenderung in der Einwirkung der inneren Kräfte am Flügel, wie sie durch Aenderung der Schlagfrequenz, des Schlagwinkels, der Form oder Grösse des Flügels, des Verhältnisses $t:\tau$ hervorgerufen werden muss, in derselben Weise die inneren Kräfte am Rumpf betroffen sind, haben aber angenommen, dass das periodische Gleichgewicht aller Kräfte am Rumpf hierdurch nicht gestört wird.

In der That treffen die Abänderungen in allen diesen Fällen fast gleichmässig ebensowohl diejenigen inneren Kräfte, welche den Rumpf heben, als diejenigen, welche ihn nach unten treiben. Kleine Veränderungen in der Art und Höhe der Rumpfoscillationen, in dem direkten Bewegungsaustausch zwischen Flügel und Rumpf durch Gelenkaxenkräfte, in den Verhältnissen der von Rumpf- und Flügelbasis hervorgerufenen Luftwiderstände, vielleicht auch kleine Abänderungen des Verhältnisses $t:\tau$ müssen aber eine gewisse Höhe erreichen, bevor das periodische Gleichgewicht der auf- und abwärts gerichteten Kräfte und Bewegungen für den Rumpf so gut als wie für den Flügel wieder hergestellt ist.

Immerhin glaube ich nicht, dass durch diese Modificationen in der Bewegung des Rumpfes, indem sie wieder auf die Verhältnisse der Flügelbewegung namentlich seiner basalen Theile zurückwirken, die in den letzten Kapiteln gewonnenen Resultate in Frage gestellt werden.

Es genügt, wenn zum Schluss ganz im Allgemeinen die Veränderungen der Arbeitsleistung der Muskulatur besprochen werden, welche von den Aenderungen der Verhältnisse des Rumpfes und der Flügelbasis abhängen. Ich verweise in dieser Beziehung zu-

nächst auf das was auf S. 97 u. ff. über die Oscillationen des Rumpfes gesagt worden ist.

Bei gleich bleibender locomotorischer Leistung macht natürlich jede Vergrösserung der aufwärts gerichteten verticalen Widerstände am Rumpf und an der Flügelbasis eine entsprechende Verminderung derjenigen an den äusseren Theilen des Flügels möglich, und umgekehrt jede Vermehrung der abwärts gerichteten Widerstände an jenen Theilen eine Vermehrung der letzteren nothwendig. Und jedes Anwachsen der schädlichen s-Widerstände am Rumpf und der Flügelbasis bedingt eine Vergrösserung der nützlichen s-Widerstände am Flügel u. s. w. Die Ausnutzung der Rumpfoscillationen zur Entwicklung eines nützlichen s-Widerstandes, indem der Rumpf und die Flügelbasis beim absteigenden Theil ihrer Trajectorien mit pronirten Unterflächen gegen die Luft gehen, könnte unter allen Umständen beim Normalflug nur gering sein, da die Trajectorien auch im günstigsten Fall noch ziemlich flach verlaufen. Thatsächlich aber ist eine derartige Anpassung der Stellung des Rumpfes an sein Trajektorium nicht nachzuweisen; die Längsrichtung des Rumpfes dreht sich überhaupt im Ganzen nur wenig auf und ab.

Da nun aber vor Allem ein dorsaler Widerstand am Rumpf vermieden werden muss, was beim Aufsteigen des Rumpfes nur durch supinirte Stellung desselben möglich ist, so wird auch während des Absteigens im Allgemeinen eine supinatorische Neigung der Rumpfaxe vorhalten. Im Vergleich zum Absteigen mit horizontaler Rumpfaxe ist dabei der nützliche verticale Widerstand an der Unterseite vermehrt; daneben macht sich natürlich auch ein schädlicher rückwärts gerichteter s-Widerstand geltend. Doch ist dieser Modus an sich unter den obwaltenden Verhältnissen der günstigste Modus der Ausnutzung der Rumpfoscillationen für die Locomotion.

Es lässt sich zeigen, dass bei geringer supinatorischer Neigung der Rumpfunterfläche die nützliche vertical aufwärts gerichtete Componente des Luftwiderstandes grösser sein kann, als die rückwärts gerichtete. Handelt es sich hier um eine wirkliche Kraftersparniss? Da die Grösse der Bewegung des Rumpfes gegen die Luft nur zum geringeren Theile von den Oscillationen des Rumpfes, zum weitaus grösseren Theil vielmehr von der horizontalen Geschwindigkeit des Ganzen abhängt, so können wir ganz allgemein untersuchen, in wie weit es vortheilhaft ist, supinirte Flächen und horizontale Geschwindigkeit zum Ge-

winn von aufwärts gerichtetem verticalen Widerstand (Auftrieb) zu benutzen. Wir wollen eine derartige Wirkung als Drachenwirkung bezeichnen.

Irgend ein ebenes Stück *Dr* der Drachenfläche, das zur Sagittalebene senkrecht steht und von der Seite gesehen zu einer Linie verkürzt erscheint (Fig. 29), bewege sich mit der horizontalen

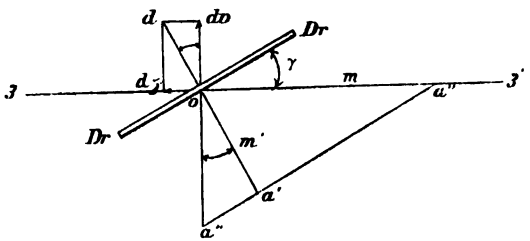


Fig. 29.

Geschwindigkeit $m = oa$ in der Richtung zz'; das entspricht einer Bewegung in der Richtung der Normalen $oa' = m' = m \sin\gamma$, wobei γ den Supinationswinkel bedeutet, und einem Widerstand in der Normalrichtung, welcher durch *od* oder kurz gesagt durch die Linie *d* dargestellt ist; seine verticale Componente $dv = d.\cos\gamma$, die horizontale Componente $dz = d \sin\gamma$. Setzen wir $d = \zeta . F(m')^2$ oder $n.(m')^2$, so ist $dv = n.m.^2 \sin^2\gamma \cos\gamma$, welcher Werth ein Maximum hat für $\gamma = 54^0 50$ und ein Minimum für $\gamma = o$ oder 90^0, $dz = n.m.^2 \sin^3\gamma$, (Minimum für $\gamma = o$, Maximum für $\gamma = 90^0$). Wir machen nun die Voraussetzung, dass dem Druck *dv* durch die Schwere oder andere, den Rumpf abwärts treibende, unvermeidliche schädliche Einflüsse das Gleichgewicht gehalten werde. Damit auch in horizontaler Richtung das Gleichgewicht der Kräfte erhalten bleibe, muss an dem Körper, zu welchem *Dr* gehört, wegen der *z*-Componente des Widerstandes auf die Drachenfläche eine Kraft $= dz$ vorwärts wirken.

Wäre *Dr* parallel zz', so würde die aufwärts gerichtete verticale locomotorische Kraft um den Betrag *dv* zu klein sein, es würde dafür aber für die Bewegung in der *z*-Richtung die locomotorische Kraft *dz* überflüssig.

Durch die Drachenwirkung wird also locomotorische Kraft der *z*-Richtung absorbirt und dafür verticale locomotorische Kraft gewonnen.

Für $\gamma < 45^0$ ist $dv > dz$, der Gewinn also scheinbar grösser als der Verlust, im Verhältniss um so grösser, je kleiner γ. Der ab-

solute Gewinn an locomotorischer Kraft $dv - dz$ ist bei gleich grossem Dr und gleicher Horizontalgeschwindigkeit m am grössten, wenn der Differentialquotient dieser Differenz $= o$ ist, oder wenn $sin^2\gamma + 3 sin\gamma = 2 cos\gamma$, was ungefähr bei $\gamma = 30^0$ der Fall ist; es ist dann dz ungefähr $= \frac{1}{2} dv$.

Würde nun die Muskelarbeit, oder sagen wir lieber der Muskelstoffumsatz in der Zeit bei der Erzeugung einer bestimmten locomotorischen Leistung in der z-Richtung doppelt so gross sein, als bei derselben locomotorischen Leistung in verticaler Richtung, so würde die Drachenwirkung bei allen Supinationswinkeln, die kleiner als 30° sind, mit Vortheil stattfinden können. Je ungünstiger aber in der z-Richtung gegenüber der v-Richtung das Verhältniss zwischen Muskelstoffumsatz und locomotorischer Leistung ist, desto kleiner ist die noch mit Vortheil verbundene grösstmögliche Supinationsstellung der Drachenflächen.

Nun geht aus den Erörterungen des vorigen Kapitels wohl mit Sicherheit hervor, dass die z-Richtung sich jenseits gewisser Grenzen der horizontalen Geschwindigkeit des Ganzen hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Stoffumsatz und locomotorischer Leistung sehr viel ungünstiger verhält, als die v-Richtung; daraus folgt, dass nur kleine Supinationswinkel mit Vortheil verwendbar sind, um so kleinere, je grösser die horizontale Geschwindigkeit m ist.

Je kleiner aber γ, desto kleiner ist bei sonst gleichen Verhältnissen der absolute Werth von dv. Der absolute Betrag eines mit sparsamerem Stoffumsatz durch Drachenwirkung von nur wenig supinirten Flächen gewonnenen Auftriebes kann nur durch Vergrösserung der Drachenfläche gesteigert werden (eine Vergrösserung von m würde eine weitere Verkleinerung von γ nöthig machen und eine weitere Verminderung des absoluten Werthes von dv zur Folge haben, wenn anders dv dabei immer noch mit Vortheil durch Drachenwirkung entwickelt werden soll). Die Vergrösserung der Drachenflächen sowohl des Rumpfes als der Flügelbasis hat aber ihre engen Grenzen. Sie ist über diese hinaus nicht möglich ohne Vergrösserung des Gewichtes der Theile, des schädlichen Widerstandes gegen das Vorderende des Rumpfes, nicht ohne Beschränkung der Excursionsfähigkeit des Flügels u. s. w.

Es kann sich also bei der Drachenwirkung, wenn sie an sich einen Vortheil, eine Ersparniss von Mus-

kelumsatz repräsentiren soll, nur um einen kleinen absoluten Werth des Auftriebes und um eine sehr kleine Ersparniss handeln.

Eine über eine gewisse Grenze hinausgehende Grösse des Auftriebes durch Dracheneinwirkung aber kann nur mit Verschwendung von Muskelstoffumsatz zu Wege gebracht werden.

Diese Ueberlegungen gelten nicht bloss für die Verhältnisse des Vogels, sondern für jeden Flugapparat. Das Bestreben, künstliche Apparate mit Hülfe von Flügeln etc. nur vorwärts zu treiben, die nöthige Wirkung nach oben aber, gegen die Schwere durch Drachenwirkung, d. h. also durch Umwandlung von horizontaler locomotorischer Leistung in verticale zu gewinnen, müssen aus den angeführten Gründen als verfehlt betrachtet werden. Auch der Vogel macht bei dem normalen horizontalen Fluge von diesem Princip keinen ausgiebigen Gebrauch, wo er es verwendet, hat dies immer noch seine besonderen Gründe [1]).

Eine geringe Supination des Rumpfes ermöglicht, wie schon erörtert wurde, die verticalen Oscillationen des Rumpfes unschädlich, ja locomotorisch nutzbar zu machen; am Flügel hilft sie das Spiel der Muskeln vereinfachen, die Configuration für den Niederschlag günstig verändern u. s. w. Uebrigens kann gerade an den äusseren Theilen des Flügels die absolute Grösse des durch Drachenwirkung zu gewinnenden Auftriebes verhältnissmässig gross sein, erstens wegen der Grösse der Fläche, zweitens weil die Horizontalgeschwindigkeit nach vorn hier vermehrt werden kann, ohne dass die Geschwindigkeit des Ganzen und damit die Verhältnisse für die Wirkung der Rückzieher des Flügels, welche natürlich die dabei verbrauchte Vorwärtsgeschwindigkeit des Ganzen wieder einbringen müssen, sich ungünstiger gestalteten.

7. Drachenwirkung auf beliebigen Trajectorien. Schweben, Flug in Wellenlinien, Kreisen.

Mit dem Begriff „Schweben" verbindet sich die Vorstellung einer mässig schnellen oder fast unmerklichen Bewegung, ja einer

[1]) Nach Prechtl l. c. pg. 216 müsste eine Krähe, wenn sie die ganze Unterfläche des Rumpfes des ausgebreiteten Schwanzes und des horizontal ausgestreckten Flügels als Drachenflächen verwenden könnte, bei einem Supinationswinkel von 20° eine horizontale Geschwindigkeit von 72,94 Fuss besitzen, damit ihr Gewicht durch den Luftwiderstand getragen würde.

vollständigen Regungslosigkeit eines anscheinend dichteren Körpers in einem dünneren, flüssigen Medium, in der Luft, im Wasser, entfernt vom Grunde, ohne Beziehung zu diesem; und zwar bleibt der Körper dabei in seiner Form mehr oder weniger unverändert, er zeigt keine nennenswerthe active locomotorische Thätigkeit. So schwebt die Wolke über uns, so der Vogel mit ausgebreiteten Schwingen. Wird die Bewegung rascher, so suchen wir gewöhnlich lieber nach einem neuen Ausdruck für die Erscheinung.

Wir erlauben uns nun im Folgenden, zur Vereinfachung der Darstellung jede Bewegung des Vogels gegenüber dem umgebenden Medium, bei welcher er seine Form nicht wesentlich, nicht durch deutlichen Flügelschlag ändert, ganz abgesehen von der Richtung und Geschwindigkeit kurzweg als Schweben im weiteren Sinne des Wortes zu bezeichnen, also auch das reissend schnelle Dahinschiessen mit angelegten Flügeln darunter zu begreifen.

Wir betrachten zunächst derartige Bewegungen da, wo sie Theilerscheinung einer beliebig lang fortzusetzenden Flugweise bilden und zwar zunächst für die Voraussetzung, dass die umgebende Atmosphäre gleichmässig ruhend oder bewegt ist.

a. Schweben in ruhender oder gleichmässig bewegter Luft.

Wenn ein Körper unter dem Einfluss der Schwere und einer zweiten Kraft, die stets in einer und derselben Verticalebene wirkt, sich bewegt und in Folge davon eine beliebige Curve in dieser Verticalebene beschreibt, so ist der Zuwachs an lebendiger Kraft, welchen der Körper bei dem Durchlaufen einer bestimmten Höhenzone seines Trajectoriums erfährt, genau so gross, wie wenn er diese Höhe in verticaler Richtung durchmessen hätte, vorausgesetzt, dass die zweite Kraft jederzeit genau senkrecht zu der Richtung des Trajectoriums wirkt. In der That hängt dann die Beschleunigung in der Richtung des Trajectoriums einzig von der Componente der Schwere ab, die in die jeweilige Richtung des Trajectoriums entfällt. Divergirt letzteres um den Winkel φ von der verticalen (Fig. 30), so ist sie $= g \cos \varphi$. Die andere Componente g

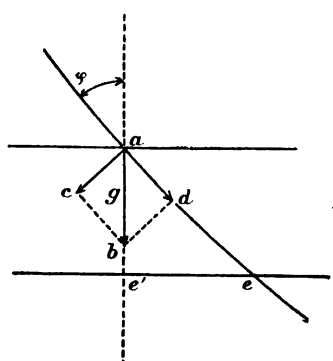


Fig. 30.

sin φ muss durch die 2. Kraft annullirt sein; ausserdem besorgt diese zweite Kraft die Abänderung der Richtung der Bewegung. Je nachdem die zweite Kraft grösser oder kleiner als $g \cos \varphi$ ist, geschieht die Ablenkung nach der einen oder anderen Seite. Es ist nun zwar die beschleunigende Kraft $g \cos \varphi$, in deren Richtung die Bewegung stattfindet, $\frac{1}{\cos \varphi}$ mal kleiner, dafür aber die Strecke *ae*, über welche der Körper sich in ihrer Richtung bewegt, ebensoviel mal grösser, als wenn der Körper in der Richtung und unter dem Einfluss der beschleunigenden verticalen Kraft g die Strecke $ae \cos \varphi = ae'$ gefallen wäre; demnach der Zuwachs an lebendiger Kraft derselbe. Mag also der Körper auf irgend einer Weise vom höchsten zum tiefsten Punkt seiner Bahn gelangt sein, so ist der Zuwachs an lebendiger Kraft der Trajectorialbewegung gleich dem Zuwachs an vertical abwärts gerichteter lebendiger Kraft, den er erfahren hätte, wenn er durch dieselbe Höhe frei gefallen wäre. Steigt der Körper in irgend einem Trajectorium um die Strecke h empor, so ist umgekehrt der Verlust an lebendiger Kraft der Trajektorialbewegung $= Ph$, wenn P das Gewicht bedeutet, d. h. gleich dem Verlust, welchen der Körper bei verticalem Aufsteigen durch dieselbe Höhenzone unter dem alleinigen Einfluss der Schwere erleiden würde.

Der Körper vermag also ohne Einbusse an Geschwindigkeit der Trajectorialbewegung die frühere maximale Höhe wiederzugewinnen; sobald aber die zweite Kraft nicht jeweilen genau senkrecht zu der Richtung des Trajectoriums wirkt, sondern eine Componente parallel dieser Richtung, eine Trajectorial-Componente hat, ändern sich die Verhältnisse; es wird dann die lebendige Kraft nicht mehr genau wie Ph von Moment zu Moment verändert.

Beim Schweben stellt der Widerstand der Luft die zweite Kraft dar, welche neben der Schwere die Bewegung des Körpers in der Sagittalebene beeinflusst. In Folge dieser beiden Einwirkungen vermag sich wirklich der Vogel als fast starrer Körper sowohl vom Ruhezustand aus, als auch von einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit an in verschieden gekrümmten Trajectorien zu bewegen.

Uns interessiren besonders die in Fig. 31 *A* und *B* dargestellten Möglichkeiten periodischer Curven. Es ist schon oft von verschiedenen Autoren auseinandergesetzt worden, wie der Vogel mit ausgebreiteten Flügeln, bei pronirter Stellung sämmtlicher

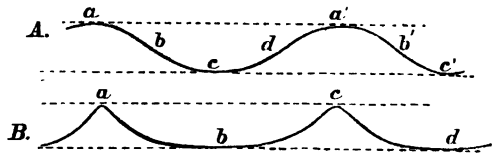


Fig. 31.

Unterflächen seines Körpers, auf der Luft wie auf einer schiefen Ebene vorwärts abwärts gleiten kann. Indem er nun die Stellung seiner Flügel, des Schwanzes und Kopfes ändert, wird er allmählich durch den Luftwiderstand in supinatorischem Sinne gedreht, zugleich ändert sich die Richtung seiner Bewegung, wird mehr und mehr horizontal, und schliesslich steigt das Thier wieder empor und vermag dank der durch das Sinken erworbenen Vorwärtsgeschwindigkeit „annähernd" die Höhe, von der es ausging, und die Horizontalgeschwindigkeit, welche es in derselben hatte, wiederzugewinnen. Dabei ist eine gewisse Zeit T verstrichen, während welcher der Schwere im Durchschnitt das Gleichgewicht gehalten worden ist, und zugleich ist eine bestimmte Wegstrecke in der s-Richtung zurückgelegt; das Alles, ohne dass ein Flügelschlag geschehen ist, und ohne dass die Flugmuskeln eine nennenswerthe Arbeit geleistet haben. Thatsächlich werde allerdings die ursprüngliche Höhe oder Horizontalgeschwindigkeit oder Beides nicht vollkommen wiedererlangt, aber wenige Flügelschläge sollen genügen, um das Verlorene wieder einzubringen. Man ist allgemein geneigt, diese Flugweise als eine ausserordentlich vortheilhafte zu betrachten. Wir wollen die Angelegenheit näher prüfen.

1) Auch wenn die längsten Durchmesser des Vogelkörpers möglichst dem Trajectorium angeschmiegt sind, so dass also das Vordertheil des Rumpfes und die Kante des Flügels genau vorangehen, so wird doch immer noch an diesen Theilen ein Widerstand erzeugt, welcher der Trajectorialbewegung entgegenwirkt; wir wollen ihn als schädlichen Trajectorialwiderstand an der Vorderseite bezeichnen.

2) Es können nun aber die Längsaxe des Rumpfes und die Sagittalprofile der Flügel unmöglich jeweilen mit ihren Trajektorien zusammenfallen, weil ja in diesem Falle ein Ablenkungswiderstand gar nicht erzeugt werden könnte. Soll der Vogel nach dem Sinken wieder aufsteigen, überhaupt eine Curve mit aufwärts ge-

richteter Concavität beschreiben, so muss jedenfalls der Widerstand dem ablenkenden Einfluss der Schwere $g \sin \varphi$ das Gleichgewicht halten und ausserdem noch eine weitere Wirkung nach oben, senkrecht zur Richtung des Trajectoriums haben; aber auch wenn der Vogel in aufwärts convexer Bahn sich bewegt, ist es wahrscheinlich, dass die Widerstände immer noch der ablenkenden Componente der Schwere entgegenwirken, dieselbe aber nicht aufzuheben vermögen. Wir wollen wirklich annehmen, dass der Ablenkungswiderstand jederzeit von unten nach oben senkrecht zum Trajectorium wirkt; um diesen nützlichen ablenkenden Widerstand zu entwickeln, muss die Unterseite des Thieres jederzeit gegen die Luft bewegt werden, also gegenüber dem Trajectorium supinirt sein. Es handelt sich also um eine Drachenwirkung (s. Cap. 6). Die Ablenkungscomponente des Widerstandes entspricht dem Auftrieb, der ja auch senkrecht zum Trajectorium wirkt; ihre Richtung fällt allerdings nicht immer mit der verticalen zusammen. Auch hier hat der Widerstand gegen die Drachenfläche neben der nützlichen ablenkenden eine schädliche Componente; dieselbe ist allerdings nicht stets parallel der z-Richtung, aber, was für die Drachenwirkung wesentlich ist, parallel der jeweiligen Trajectorialrichtung gerichtet. Wir können uns demnach etwa das nebenstehende Schema von der Bewegung entwerfen (Fig. 32). Durch $a\,b\,c\,d\,a'$ ist dargestellt: das Trajec-

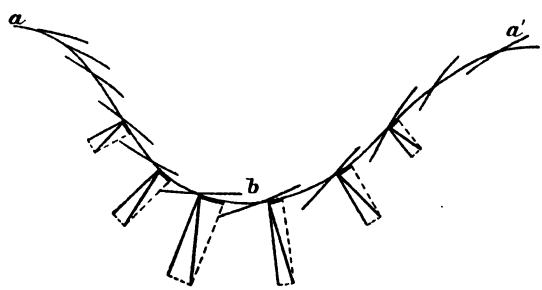


Fig. 32.

torium; durch die im spitzen Winkel anliegenden kurzen Linien: die jeweiligen Stellungen der Sagittalprofile; durch die dazu senkrechten Linien: die Widerstände an der Drachenfläche; es ist ihre Zerlegung in die ablenkende und Trajectorialcomponente überall ausgeführt. Soll das Thier wirklich die alte Höhe und

Horizontalgeschwindigkeit (des Punktes *a* in Fig. 31 *A* und *B*) wiedererlangen, so muss der Verlust an lebendiger Kraft (oder Energie der Lage), welcher durch den Trajectorialwiderstand gegen die Vorderflächen und durch die Trajectorialcomponente des Widerstandes gegen die Drachenflächen herbeigeführt würde, wieder ersetzt werden.

Die letztgenannte Componente ist im Verhältniss zur nützlichen ablenkenden um so kleiner, je kleiner der Supinationswinkel γ; mit diesem vermindert sich aber auch zugleich der absolute Werth der letzteren. Wohl aber erlaubt eine besondere Grösse der Drachflächen unter sonst gleichen Verhältnissen einen grösseren absoluten Werth der Ablenkung.

Je rascher die Richtungsänderung erfolgt, desto grösser müssen bei sonst gleichen Verhältnissen die ablenkenden Kräfte sein; desto grösser der Supinationswinkel γ, desto grösser der Verlust an Energie. Daher werden im Allgemeinen zu plötzliche Biegungen vermieden. Das Sinken und Wiederaufsteigen ohne Flügelschlag, die „Ressource" der französischen Autoren geschieht nicht entfernt so, dass die Flugbahn in der tiefsten Stelle einen scharfen Winkel beschreibt, und ist durchaus nicht etwa mit dem Aufprallen eines Gegenstandes an ein elastisches Polster und mit dem Wiederabgetriebenwerden von demselben zu vergleichen, wie Manche zu thun geneigt sind. Solche scharfe Wendepunkte können nur an oberen Gipfelpunkten der Trajectorien ohne grössere Anstrengung, mitten in rascher Bewegung aber nur von besonders kühnen Fliegern ausgeführt werden, von kleineren im Allgemeinen besser als von grössern. Eine Steigerung der Grösse des Supinationswinkels über 54° bewirkt überhaupt nicht mehr eine Vergrösserung, sondern eine Verkleinerung der Ablenkungscomponente. Steht die Fläche senkrecht zum Trajectorium, so ist die Ablenkung = 0.

Wir wollen später untersuchen, in welcher Weise der Verlust wieder eingebracht werden kann. Zunächst werde vorausgesetzt, dass es geschieht; ist der frühere Zustand wiederhergestellt, so kann eine zweite Aktion derselben Art beginnen; es handelt sich dann um eine periodische Thätigkeit. Der Moment des höchsten Standes repräsentire den Beginn der Periode, dann nimmt zunächst die verticale Bewegung nach unten zu, erreicht ein Maximum, nimmt wieder ab, bis 0, wird negativ, und es erfolgt Aufsteigen, das bis zu einem Maximum beschleunigt wird, worauf wieder Verlangsamung bis 0 eintritt. Die horizontale Geschwindig-

keit nach vorn dagegen wächst bis gegen die Mitte der Periode, um ein Maximum zu erreichen und dann wieder bis zu einem Minimum abzunehmen. Man wird deswegen schliessen müssen, dass die verticalen Widerstände von 0 oder doch einem geringen Werthe anallmählich zunehmen, das Maximum ihrer Wirkung nach oben ungefähr in der Mitte der Periode haben und allmählich wieder abnehmen (vgl. Einleitung); ihr Kräftefeld muss demjenigen der Schwere gleich sein.

Was nun zunächst die Trajectorialwiderstände gegen die Vorderflächen von Rumpf und Flügel betrifft, so sind ihre verticalen Componenten im Ganzen $= o$; es müssen also schon allein die Widerstände senkrecht zur Drachenfläche, welche am Körper ventro-dorsalwärts wirken, der Schwere das Gleichgewicht halten, und da sie meist schräg zur Verticalrichtung wirken, so muss das Kräftefeld ihrer ventro-dorsal gerichteten Einwirkung auf den Vogel erheblich grösser als GT sein, um so viel grösser, je grösser γ und je grösser bei sonst gleichen Verhältnissen die Richtungsänderung der Trajectoriums ist.[1])

Wir wenden uns jetzt zur Beurtheilung der Anforderungen, welche bei einer derartigen periodischen Bewegung an die Muskeln gestellt werden, und zu dem Verhältniss zwischen diesen Anforderungen und der locomotorischen Leistung.

Periodische Anstrengung zum Wiedergewinn der verlorenen Energie.

Thiere, welche beim Schweben in sagittalen Curven ihre Flügel ausgestreckt halten, ersetzen die verloreue Energie gegen Ende der Periode, wenn Aufwärtsbewegung und Horizontalgeschwindigkeit wieder verlangsamt sind, indem sie durch Flügelschläge mehr oder weniger steil aufsteigen. Die Mauerschwalbe steigt oft fast senkrecht in die Höhe, Möven und Kibitze machen ähnliche kühne Evolutionen, Krähen und Dohlen heben sich ebenfalls ziemlich steil; der Storch verbraucht schon beim Abwärtsgleiten in wenig gesenkter gerader Linie einen grossen Theil der erworbenen Hori-

[1]) Da übrigens während des Absteigens die sämmtlichen Trajectorialwiderstände eine aufwärts gerichtete, während des Aufsteigens aber eine abwärts gerichtete verticale Componente haben, so kann beim Absteigen der Ablenkungswiderstand zunächst etwas kleiner sein, oder das Trajectorium steiler, oder der Winkel γ kleiner als in den entsprechenden Höhenlagen beim Aufsteigen.

zontalgeschwindigkeit und hebt sich langsam wieder durch Flügelschläge fast vom tiefsten Punkt seines Trajectoriums an. Der Sperber schlägt 2, 3, 4 mal mit den Flügeln, hebt sich dadurch und gleitet nun eine Strecke weit vorwärts abwärts, um bald von Neuem mit den Flügeln zu schlagen. In allen Fällen ist das Wideraufsteigen durch Flügelschlag und die oft damit verbundene Beschleunigung der Horizontalgeschwindigkeit mit viel mehr Muskelarbeit (Beanspruchung der Muskeln auf Spannung und Excursionsgeschwindigkeit) bewerkstelligt, als der einfache horizontale Normalflug mit gleichmässiger mittlerer Geschwindigkeit in derselben Zeit. Dies macht also einen Theil der Ersparniss an Stoffumsatz, welche zuvor, während des Schwebens allenfalls verwirklicht worden ist, wieder zu nichte.

Im vorigen Kapitel wurde nachgewiesen, dass bei der Drachenwirkung dem Gewinn an locomotorischer Kraft nach oben (Auftrieb) ein Verlust an locomotorischer Kraft für die Trajectorialbewegung entspricht, der zwar erheblich geringer sein kann; da aber dieser Verlust durch grössere locomotorische Anstrengung des Thieres zur Beschleunigung der Trajectorialbewegung immer wieder ersetzt wird, und bei Anstrengungen dieser Art möglicherweise das Verhältniss zwischen Muskelarbeit und locomotorischer Leistung ein sehr viel ungünstigeres ist als bei der direkten Erzeugung von Auftrieb durch Flügelschlag, so kann möglicherweise der Nutzen der Drachenwirkung $= o$ sein, ja sich in einen Nachtheil verwandeln. Wir kamen zu dem Schlusse, dass wirklich beim horizontalen Normalflug eine Drachenwirkung von erheblichem Belang nicht mit Vortheil stattfinden könne. Hier nun, bei der Drachenwirkung auf gekrümmtem Trajectorium, müssen ganz ähnliche Gesichtspunkte geltend gemacht werden. Die ganze locomotorische Leistung gegenüber der Schwere während einer bestimmten Zeit muss durch den Auftrieb geschehen; dem entspricht ein Verlust an locomotorischer Leistung in der z-Richtung, der zwar nicht so gross zu sein braucht, als der Gewinn; doch ist das Verhältniss bei sonst gleichen Verhältnissen nicht so günstig als beim horizontalen Fluge, um so weniger, je stärker gekrümmt die Bahn ist und je grösser γ. Andererseits geschieht die Wiederersetzung des Verlustes an Geschwindigkeit und Weg, der durch die Vernichtung eines Theiles der locomotorischen Kraft in der Trajectorialrichtung entstanden ist, unter günstigeren Verhältnissen, als es beim horizontalen Normalflug möglich ist. Die horizontale Geschwindigkeit des Ganzen unter-

liegt sehr starker periodischer Zu- und Abnahme; es wird die Zeit des Geschwindigkeitminimums gewählt, um die nöthige Vorwärtsbeschleunigung zu erzielen. Oder statt einer gesteigerten Aktion am höchsten horizontalen Theil des Trajectoriums, welche zur Beschleunigung der horizontalen Geschwindigkeit dient, werden stärkere Anstrengungen zum Aufsteigen gemacht und zwar zur Zeit des Minimums der verticalen Geschwindigkeit; in beiden Fällen arbeiten die Muskeln vortheilhafter, als zur Beschleunigung der horizontalen Bewegung bei einem erheblich raschen horizontalen Fluge.

Diese Art der Betrachtung scheint mir geeignet zu zeigen, dass beim Schweben in gekrümmter sagittaler Bahn so gut wie bei jeder anderen Drachenwirkung nur eine Uebertragung der locomotorischen Kraftwirkung aus der einen Richtung in die andere und zwar an sich mit einigem Verlust stattfindet. Ein Vogel, der beim Flug in regelmässigen Perioden theils schwebend, theils durch Flügelschlag auf- und wieder absteigt, dabei in derselben Höhe bleibt und dieselbe mittlere horizontale Geschwindigkeit behält, muss vielleicht die Hälfte der locomotorischen Kraft, welche er in der Richtung senkrecht zu seinem Trajectorium erspart, in der Richtung des Trajectoriums mehr entwickeln, um das periodische Gleichgewicht der Bewegung zu unterhalten; das Verhältniss zwischen Muskelarbeit und locomotorischem Nutzeffekt kann sich hier nicht zu sehr verschieden verhalten von dem Fall, wo der Vogel sich in derselben mittleren Richtung, mit derselben mittleren Geschwindigkeit, aber durch lauter einzelne Flügelschläge bewegt. Dabei darf nicht vergessen werden, dass er sich nicht auf der kürzesten Linie, sondern auf Umwegen fortbewegt. Der schädliche Trajectorialwiderstand an der Vorderseite ist also an sich grösser als beim horizontalen Normalflug mit gleicher Horizontalgeschwindigkeit.

Beurtheilung der nothwendigen Muskelspannung zur Fixation des Schultergelenkes.

Ausserdem muss in Betracht gezogen werden, dass in den meisten Fällen nicht der Rumpf allein als Drachenfläche wirkt, sondern auch der Flügel, und zwar so, dass der Widerstand am Flügel viel grösser ist als der Widerstand an den Drachenflächen des Rumpfes. Es müssen in diesem Falle innere Gelenkdrehkräfte wirksam sein, um den Flügel in seiner Lage zum Rumpf zu er-

halten. Je weniger diese Fixation durch passive Sperrvorrichtungen zu Stande gebracht wird, sondern durch Muskelspannung, desto mehr muss die hieraus entspringende Beanspruchung der Muskulatur noch besonders in Rechnung gebracht werden.

Für den Fall, dass der Flügel horizontal ausgestreckt als Drachenfläche so gut wie die Rumpfunterfläche benutzt wird, und nur Muskeln als innere Gelenkdrehkräfte in Betracht kommen, verhält sich die Anforderung an die Muskelspannung folgendermassen:

Wir zerlegen den Widerstand an der Unterfläche des Flügels W_f und zwar seine verticale Componente W_{vf}, desgleichen das Flügelgewicht F, endlich die verticalen inneren Gelenkdrehkräfte nach o und ε in der bekannten Weise; C und D sind hier wegen der fehlenden inneren Bewegung $= o$, dann ist die resultirende verticale Kraft am Flügelschwerpunkt $= F_\varepsilon + J_{\varepsilon v} - W_{f\varepsilon v}$, wobei die Buchstabengrössen die absoluten Werthe bedeuten. Diese Grösse ist absolut $= {}^1/_m . (W_{fov} + W_r + J_{\varepsilon v} - R - F_o)$ wobei $m = \frac{R}{F}$.

Ferner ist $W_{fv} - F = R - W_{ro}$ gleich dem Antheil des Flügelwiderstandes, welcher für den Flügel überflüssig ist und theils durch o, theils durch Vermittlung von $J_{\varepsilon v}$ dem Rumpf zu Gute kommt. Für $W = P$ ist $J_{\varepsilon v} = F_\varepsilon - W_{f\varepsilon}$; für $W_0 = xP$ wächst jede Componente von W_v um das $x$fache.

Es ist dann also $J_{\varepsilon v} = x W_{f\varepsilon v} - F_\varepsilon$.

Es ist nun zu berücksichtigen, dass beim Fehlen jeder relativen Bewegung der Antheil W_{fo} verhältnissmässig gross, $W_{f\varepsilon}$ verhältnissmässig klein ist. Setzen wir beispielshalber $F = \frac{3}{2} F_\varepsilon = \frac{1}{5} P$ und $W_{f\varepsilon v} = \frac{3}{4} W_{fv} = \frac{3}{4} . \frac{1}{5} W_v$, wobei der Flügel verhältnissmässig eher noch zu klein angenommen ist, so ist

$$J_{\varepsilon v} = -\tfrac{3}{15} P + x . \tfrac{3}{5} W_v;$$

da $x W_v$ im Mittel $= P$, so wäre dann

$J_{\varepsilon v}$ im Mittel $= \frac{7}{15} P$ oder ungefähr $\frac{1}{2} P$.

Erheblich grösser aber sind im Mittel die Anforderungen an die Gesammtspannung der Muskulatur in der dorso ventralen Richtung; der Unterschied ist um so grösser, je mehr diese Richtung von der verticalen abweicht, je steiler und tiefer also bei sonst gleichen Verhältnissen das Thier fällt und je steiler und höher es wieder aufsteigt; zugleich erhöht sich dabei das Maximum der Spannung mehr als ihr Mittelwerth. Ist dies in hohem Grade der Fall, so sind die Muskeln auf Spannung

sowohl hinsichtlich des Mittelwerthes, als mit Bezug auf das Maximum sicher nicht weniger beansprucht, als beim horizontalen Normalflug. Zugleich ist auch die Festigkeit des Stützapparates, namentlich auch der Gelenkbänder in hohem Masse in Anspruch genommen. Beim Normalflug fällt allerdings die nöthige Spannung zur Hemmung der Abwärtsbewegung und zur Einleitung der Hebung als Mehranstrengung ins Gewicht; dafür geht der Flügel weniger als Drache gegen die Luft und sind nicht so viel Spannungen vorne am Gelenk nöthig, oder wo sie vorhanden sind und den Flügel supinirt vorführen, sind die Hebespannungen dafür geringer.

Bei allmählicherer Abänderung der Richtung des Trajectoriums dagegen, wenn steilere Steigung und Senkung vermieden wird, und bei kleinem Supinationswinkel ist allem Anschein nach die Beanspruchung der Muskeln auf Spannung geringer und gleichmässiger als beim horizontalen Normalflug.

Ganz besonders können die Flügelheber entlastet sein; sie können längere Zeit vollständig ruhen und sich erholen, so dass sie wohl die Anstrengung, welche ihnen von Zeit zu Zeit auferlegt wird, mit verhältnissmässig geringem Querschnitt leisten können.

Die Excursion der Muskeln bei dieser Fixation ist = 0, desgleichen also die äussere Arbeit, die sie verrichten. Wären die Muskeln, welche diese Spannung leisten, diesem Verhältniss angepasst, so könnten sie theoretisch genommen die Länge, die Masse, den Stoffumsatz gleich = 0 haben. Statt der Muskulatur könnte ein Band, eine Sperrvorrichtung des Skeletes dasselbe leisten.

Es ist mir gar nicht unwahrscheinlich, dass gerade beim Schweben die Gelenkbänder einen Theil der Fixation und zwar als Gelenkdrehkräfte übernehmen; doch hat bis jetzt Niemand daran gedacht, nach solchen Einrichtungen zu suchen. Vielleicht werde ich Gelegenheit finden, diese Lücke unserer Kenntniss seiner Zeit auszufüllen. Ganz überflüssig wird die Spannung der Muskeln auf keinen Fall; ja in der Regel übernehmen sie weitaus den grössten Theil der Aufgabe. Es sind das nun dieselben Muskeln, welche zu anderen Zeiten dem normalen Flug, dem Aufsteigen etc. dienen, also hinsichtlich ihrer Excursionsgeschwindigkeit mindestens den Anforderungen des normalen Fluges genügen müssen; alternirend mit nicht zu langen Perioden des Schwebens werden sie sogar in dieser Hinsicht in stärkerer Weise in Anspruch genommen. Eine Anpassung ihrer Länge an das Schweben allein ist demnach

undenkbar. Vielleicht können die Muskeln bei unverändertem Querschnitt um ein Geringes kürzer sein, wenn das Schweben wirklich die häufigere Bewegung darstellt; der gewöhnliche normale Horizontalflug ist dann bereits eine Extraleistung; die Fähigkeit zu besonderen Extraleistungen des Steigens u. s. w. müsste dann natürlich entsprechend eingeschränkt sein. Man sieht, dass eine derartige Verkürzung nicht ohne anderweitigen Schaden stattfinden kann. Die Muskelmenge kann daher kaum erheblich eingeschränkt sein, auch wenn das Thier häufig in ruhiger oder gleichmässig bewegter Luft schwebt. Sind aber vielleicht im Muskel selbst Einrichtungen getroffen, welche gestatten, dass er dieselbe Spannung bei geringer oder fehlender Verkürzung in derselben Zeit mit geringerem Stoffumsatz leistet, als bei ausgiebiger Verkürzung? Solche Einrichtungen würden gewiss sehr nützlich sein.

Es ist z. B. zu erwägen, ob nicht vielleicht derselbe Muskel zwei Substanzen von verschiedener Qualität enthält, einmal eine, welche zu rascher Längenänderung geeignet ist, in der sich wohl auch der Stoffwechsel bei derselben Spannung rascher abspielt, daneben aber eine zweite, welche, einmal gereizt, lange in demselben Zustande verharrt, ungereizt aber der Verkürzung des Muskels *k* ein zu grosses Hinderniss entgegensetzt. Zugleich dürfte die Masse des Ganzen durch diese zweite Substanz nicht zu sehr vermehrt sein. Beides wäre vielleicht am besten möglich, wenn diese zweite Substanz gleichsam das Stützgerüst für die erstere bildete, eine Art Netzwerk, ähnlich wie die elastischen Substanzen gegenüber den fibrösen, mit welchen sie liirt sind, sich verhalten. (S. die Untersuchungen von Danilewsky und unsere Bemerkungen auf S. 176 u. ff.).

Es ist die Möglichkeit nicht von der Hand zu weisen, dass für die Fixation des Flügels gegenüber dem Rumpf besondere, mit geringem Stoffumsatz Spannung entwickelnde contractile Substanzen thätig sind. Die dem Flug mit Flügelschlägen dienende Muskelmasse könnte, weil seltener gebraucht, einen verhältnissmässig geringeren Querschnitt haben; die zur Fixation verwendete würde auf active Längenänderung wenig beansprucht sein. Doch würde die Feststellung des Schultergelenkes beim Schweben natürlich immer noch Muskelstoffumsatz erfordern, die hierbei in Frage kommenden Muskelbestandtheile würden eine ganz erhebliche Masse darstellen müssen. Kleine Flieger, auch noch Drosseln und Spechte vermeiden diese zur activen Fixation nothwendige Stoff-

ausgabe, indem sie den grössten Theil der wellenförmigen Trajectorien und zwar gerade die aufwärts convexen Abschnitte mit eng an den Leib geschmiegten Flügeln durchmessen; an den tiefsten Stellen aber schlagen sie rasch mit den Flügeln, offenbar um ihre Abwärtsbewegung zu hemmen, sich aufzurichten und wieder emporzutreiben. Dies stellt die gewöhnlichste Art ihres Fluges dar.

Ich wende mich nun zu der Frage, wie überhaupt, je nach der Grösse und dem Gewicht des Apparates, die Verhältnisse der Arbeitsleistung und Stoffausgabe im Schweben sich ändern.

Man kann sich vorstellen, dass zwei Vögel vollständig geometrisch ähnlich gebaut sind; die entsprechenden Abstände correspondirender Punkte sind dann bei dem einen im Vergleich zum andern ein bestimmtes λ faches, correspondirende Flächen ein λ^2 faches, correspondirende Volumina und Massen, ebenso das Gewicht P ein λ^3 faches. Die entspechenden Massen und Volumina beider verhalten sich also wie die Gewichte P, entsprechende Flächen wie $P^{2/3}$, entsprechende Längen wie $P^{1/3}$.

Bei genau derselben Stellung des ganzen Thieres und seiner Theile zum Trajectorium müssen die Geschwindigkeiten sich wie $P^{1/6}$ verhalten, damit die entsprechend zum Thier gerichteten Widerstände sich wie P verhalten; ist die Neigung des Trajectoriums zur Verticalen dieselbe (Winkel φ), so verhält sich auch $P\cos\varphi$ und $P\sin\varphi$ wie P. Die resultirende Ablenkung, welche von der Masse M, von $P\sin\varphi$ und der ablenkenden Componente des Widerstandes abhängt, ist dann in dem folgenden kleinen Zeitabschnitt gleich gross, ebenso die Aenderung der Trajectorialgeschwindigkeit, die Trajectorialgeschwindigkeit aber verhält, sich wie $P^{1/6}$. Es muss demnach ein Zeitraum, der sich wie $P^{1/6}$ verhält, vergehen, damit die Richtungsänderung des Trajectoriums dieselbe ist; der dabei zurückgelegte Weg verhält sich wie $P^{1/3}$. Am Ende der Phase, die sich wie $P^{1/6}$ verhält, ist die Geschwindigkeitsänderung in jeder Richtung ebenfalls $P^{1/6}$ proportional, demnach ist es auch die Geschwindigkeit selbst nach Grösse und Richtung. Auch in der folgenden Phase kann daher der Widerstand proportional P sein u. s. w. So können sämmtliche folgende correspondirende Phasen sich hinsichtlich ihrer Dauer verhalten wie $P^{1/6}$, die dabei zurückgelegten Wege wie $P^{1/3}$, die Aenderungen der Geschwindigkeit können nach Grösse und Richtung dieselben sein. Die beschriebenen Curven sind sich in der Form ähnlich, die periodischen Excursionen verhalten sich in verticaler und horizontaler Richtung wie $P^{1/3}$, die Zeiten, in denen sie zurückgelegt werden, wie $P^{1/6}$. Das Verhältniss

der Maxima und Minima des Widerstandes zu P ist bei beiden Thieren dasselbe. Die Ansprüche an die Spannung der das Gelenk fixirenden Muskeln verhalten sich wie P; dasselbe gilt bei den Aktionen, welche allenfalls angewendet werden, um den Verlust an Energie (der sich wie $P^{7/6}$ verhält) zu ersetzen, doch müssen sich dabei auch die Excursionsgeschwindigkeiten wie $P^{1/6}$ verhalten.

Es müsste demnach mit der Grösse des Thieres die Muskulatur in ganz ähnlicher Weise wachsen, wie für die Verhältnisse des normalen Fluges, wovon im nächsten Kapitel die Rede sein soll, damit bei grösseren Thieren ein Schweben in ähnlicher Curve (resp. eine ähnliche, continuirliche, aus Schweben und Flügelschlägen zusammengesetzte periodische Bewegung) möglich wird, wobei der Einwirkung der Schwere in gleicher Weise das Gleichgewicht gehalten wird, und die mittlere Geschwindigkeit der horizontalen Bewegung wie $P^{1/6}$ wächst. Es soll im folgenden Kapitel genauer erörtert werden, dass die Muskulatur in solcher Weise nicht wachsen kann.

Es folgt daraus, dass grössere Thiere darauf angewiesen sind, beim Schweben mit ihren Kräften mehr Haus zu halten. Sie vermeiden plötzliche Wendungen bei grosser Geschwindigkeit; die Curven, welche sie beschreiben, sind deshalb flacher, die Unterschiede der Geschwindigkeit nicht so gross; auch wenn sie absteigen, um zunächst in dem tieferen Niveau zu verbleiben, geschieht dies in mehr horizontaler Linie und mit mehr gleichmässiger Geschwindigkeit; sie wären wohl im Stande, schneller als kleine Vögel, wegen der verhältnissmässig kleineren Oberfläche, durch dieselbe Höhe abzusteigen, wenn sie ihren Körper ebenso sehr wie diese proniren; aber um aus der schnellen Abwärtsbewegung rasch in die horizontale umzubiegen, oder um die Gewalt des Schusses rasch zu brechen, oder um plötzlich wieder aufzusteigen, dazu fehlen ihnen die nothwendigen Muskelkräfte. Auch das Verhältniss der passiven Theile nöthigt, zu grosse Maxima des Widerstandes zu vermeiden.

Zusammenfassung.

In allen Fällen des Schwebens, in welcher Combination es auch vorkommen mag, handelt es sich um eine Drachenwirkung. Wir haben namentlich diejenigen Fälle in Auge gefasst, wo bei einer locomotorischen Leistung, welche auch durch normalen Flug

ausführbar wäre, Perioden des Schwebens in dieser oder jener Weise eingeführt sind. Es ergab sich, dass durch das Schweben keine ganz absonderliche Ersparniss an Stoffumsatz ermöglicht, und keineswegs eine viel geringere Muskelmenge zulässig gemacht wird. Damit ist nicht geleugnet, dass das Schweben eine thatsächliche Ersparniss an Stoffumsatz in gewissen Fällen verursachen kann, namentlich wenn zu plötzliche Aenderungen der Richtung der Bewegung und zu grosse Supinationswinkel der Drachenflächen vermieden werden, und wenn der Wiederersatz der verlorenen Trajectorialgeschwindigkeit unter verhältnissmässig günstigen äusseren Umständen geschen kann. Dieser Vortheil würde mehr ins Gewicht fallen, wenn die Muskeln bei des Feststellung des Schultergelenkes dieselbe Spannung sparsamer leisteten, als beim Flügelschlag.

Sicher aber liegt in vielen Fällen der Vortheil des Schwebens, oder sagen wir lieber der Drachenwirkung von Rumpf + Flügel anderswo als in der Ersparniss von Stoffumsatz.

Vor Allem kommt die Vereinfachung der ganzen inneren Bewegung und die Ersparniss an Willensanstrengung in Betracht, die geringere Inanspruchnahme der Aufmerksamkeit durch die Bewegung selbst, auch vielleicht die geringere Erschütterung.

Sodann handelt es sich nicht immer darum, in genau horizontaler Linie mit erheblicher Geschwindigkeit weiter zu gehen.

Manchmal ist es dem Thiere daran gelegen annähernd an derselben Stelle zu bleiben; durch Auf- und Niederschweben kann die mangelnde Fähigkeit zu rütteln ersetzt werden.

Raubvögel z. B. steigen langsam, vielleicht in einer weiten Spirallinie in die Höhe, bis sie einen Raub erspähen; dann handelt es sich darum, mit grosser Geschwindigkeit schräg zu demselben abzusteigen; dies kann mit gleichmässiger Geschwindigkeit, in gerader Linie schwebend geschehen.

So ist in hunderterlei Art und Weise die Drachenwirkung der Flugflächen zur Regulation der Grösse und Richtung der Bewegung, zur Ausnutzung der Einwirkung der Schwere oder der erworbenen Geschwindigkeit entgegen der Schwere nützlich.

Sie erleichtert überhaupt den lebhafteren Verkehr in der 3., der verticalen Dimension der Luft; doch sind für denselben nicht alle Flieger in gleicher Weise geeignet. Wo die Beute in der Luft zu erjagen ist, spielt diese Fähigkeit eine grosse Rolle; man braucht nur Schwalben oder auch Fledermäuse bei ihrem Nah-

rungserwerb zu beobachten. Endlich dient diese Drachenwirkung ganz besonders dem Bedürfniss und Gefallen der Thiere an lebhaftem, gaukelnden Spiel oder an kühnem Kampfe.

b. Drachenflug in ungleichmässig bewegter Luft.

Unser Urtheil über die Bedeutung des Schwebens (der Drachenwirkung) für die Ortsbewegung der Flugthiere wäre aber einseitig, wenn wir bloss die Verhältnisse einer gleichmässig bewegten Atmosphäre ins Auge fassen wollten.

Es kann nicht bezweifelt werden, dass unter Umständen grössere Vögel viele Minuten, ja Viertelstunden lang und während noch grösserer Zeit, ohne einen Flügelschlag zu thun, in derselben Höhe bleiben, ja beträchtlich aufsteigen können. Darwin hat beobachtet [1]), wie der Condor halbe Stunden lang ohne sichtbaren Flügelschlag in grossen Curven oder Cirkeln auf- und absteigend sich bewegte. Ich kann es mir füglich ersparen, noch andere Beispiele glaubwürdiger Beobachtungen über diesen Punkt hier aufzuführen, da vielleicht jeder meiner Leser Gelegenheit gehabt hat, einen Geier, oder Storch, oder einen Weih, eine Möve, einen Bussard, oder unter Umständen sogar eine Krähe oder Dohle beim Kreisen zu beobachten. Reisende berichten, dass der Albatros oft während beliebig langer Zeit über den Wogen mit ausgebreiteten Fittichen ohne Flügelschlag dahingleitet. Viele Erklärungen dieser auffallenden Thatsache sind versucht, scharfsinnige Theorien sind aufgestellt worden, manche Autoren haben eine Bewegung der Luft ganz richtig als causa sine qua non hingestellt, aber sie hielten eine gleichmässige Bewegung der Luft für genügend, so auch kürzlich Müllenhoff [2]). Alle Versuche der Erklärung mussten fehlschlagen, so lange sie nicht auf die ungleichmässige Bewegung der Luft Bezug nahmen.

In der That ist es vollkommen gleichgültig, ob die Atmosphäre, in welcher der Flug stattfindet, in Ruhe oder gleichmässig bewegt ist; die Geschwindigkeit der Strömung könnte eine ausserordentlich grosse sein, und doch würde das Thier, einmal in ihr befindlich, keine weitere Einwirkung mehr von derselben erfahren. Das ist so selbstverständlich, dass man kaum begreift, wie es übersehen werden konnte. Es ist das Verdienst englischer For-

---

[1]) Darwin, Reise eines Naturforschers um die Erde. IX. Cap.

[2]) K. Müllenhoff, Die Grösse der Flugflächen. Pflügers Archiv, XXXV, pg. 427 u. 428.

scher, zunächst von RAYLEIGH [1]), dann von HUBERT AIRY [2]), COURTENAY [3]) und Andern, die so räthselhaft erscheinenden Verhältnisse des Kreisens aufgeklärt zu haben.

Zahlreiche Beobachtungen zeigten, dass das Kreisen nur bei bewegter Luft stattfindet. Fast ausnahmslos verschiebt sich bei fortgesetztem Kreisen das Centrum der Touren in der Richtung des Windes und nach oben. Die Bewegung wird oft, so weit das Auge folgen kann, in demselben Sinne fortgesetzt; in anderen Fällen wieder biegt das Thier in S-förmiger Bahn zur Seite ab und kreist nun in der entgegengesetzten Richtung; bei mehr stürmischem Wetter werden die complicirtesten Touren ausgeführt. Jene englischen Forscher sind von ähnlichen Beobachtungen ausgegangen und haben hervorgehoben, dass in der bewegten Luft Verschiedenheiten der Strömungen bestehen, nicht etwa bloss da, wo übereinander liegende Luftschichten absolut in verschiedener Richtung bewegt werden, sondern auch zwischen Luftmassen, die in derselben Richtung dahintreiben. So werden z. B. bei scheinbar gleichmässigem Winde die der Erdoberfläche benachbarten Theile stärker gehemmt; aber auch nebeneinander dahinziehende Luftmassen können sich verschieden verhalten; überall, wo solche Unterschiede bestehen, strömt die eine Luftmasse relativ zur andern in entgegengesetzter Richtung.

An den Grenzflächen entstehen grössere oder kleinere Wirbel, die in bestimmter typischer Weise weiter wandern. Die verschiedensten localen Verhältnisse verursachen locale Strömungen, Gegenströmungen und Wirbelbewegungen. Von all' diesen Verschiedenheiten zieht der Vogel im geeigneten Falle Nutzen. Wo z. B. zwei Ströme nebeneinander bestehen, die einen Geschwindigkeitsunterschied $= V$ haben (Fig. 33 A und B), bewegt sich das Thier zunächst in und mit dem einen Strom A, erwirbt sich durch Flügelschläge oder durch Abwärtsschweben gegenüber seiner Umgebung eine bestimmte lebendige Kraft, mehr oder weniger in der Richtung der Strömung A; dann biegt es allmählich senkrecht gegen die eine Grenzfläche der Strömung um und wird (bei a Fig. 33) plötzlich von der Gegenströmung B erfasst. Vermöge der erworbenen lebendigen Kraft würde es in der Strömung A nicht ganz zur alten Höhe und Geschwindigkeit wieder empor-

---

[1]) RAYLEIGH, Nature XXVII, pg. 535.
[2]) HUBERT AIRY, Nature XXVII, pg. 590.
[3]) R. COURTENAY, Nature XXVIII, pg. 28.

gestiegen sein. Diese Energie kann auch im Strom B ausgenutzt werden; ausserdem aber besitzt der Körper, dessen Masse mit M bezeichnet sei, entgegen den als ruhend gedachten Luftmassen der Strömung B eine Anfangsgeschwindigkeit $= V$ oder eine lebendige Kraft $\frac{1}{2} MV.^2$. Auch diese kann zum Aufsteigen benutzt und verbraucht werden. Dabei erhält das Thier mehr und mehr die Geschwindigkeit der Strömung B, steigt vielleicht wieder etwas in ihr ab, eilt ihr dadurch voraus und biegt wieder (bei c) in den Strom A hinein. Dieser hat gegenüber der als ruhend gedachten Luftmasse B wieder die Geschwindigkeit V; es wiederholt sich also eine ganz ähnliche Wechselwirkung, wie vorhin beim Uebertritt von A nach B.

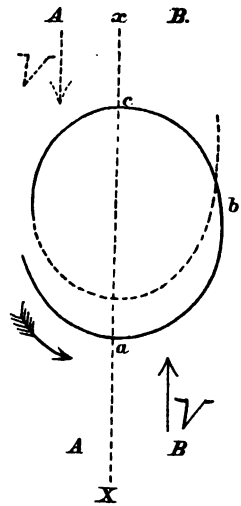


Fig. 33.

Die Drachenflächen müssen natürlich den neu einwirkenden Strömungen zugekehrt sein, bei a gegen X, bei c gegen x hin. Auch die Ebene des Schwanzes spielt hierbei eine wichtige Rolle.

Man erkennt, dass durch die geschickte Benutzung der Strömungsdifferenz der Luft der Vogel eine beträchtliche Hebung erfahren muss, sodass er wohl in derselben Höhe zu bleiben, ja aufzusteigen vermag. Doch wäre es verdienstlich, hierüber noch genaue Berechnungen anzustellen. In ähnlicher Weise können auch Geschwindigkeitsdifferenzen übereinander hinziehender Luftschichten, ferner Luftwirbel etc. verwerthet werden. Die ganze Anstrengung, die der Vogel zu machen hat, beschränkt sich dann auf die Regulirung der Flügel-, Schwanz- und Kopfstellung und auf die Feststellung der Flügel im Schultergelenk.

An jeder Mauer, jedem Hausdach, jeder Erhöhung des Bodens staut sich der Wind, und bildet sich eine an der Windseite aufsteigende Strömung aus; Aehnliches beobachtete Möbius an der Windseite seines Schiffes; er macht wahrscheinlich, dass auch über den grossen Meereswogen ähnliche Deviationen der Luftströmung stattfinden. Wenn nun ein mit Flugflächen versehenes Thier, ein fliegender Fisch oder ein Vogel aus verhältnissmässig ruhiger, oder horizontal bewegter Luft in diese aufsteigenden Strömungen von der Seite eintaucht, sich mit emporreissen lässt und rechtzeitig

wieder aus ihnen heraustritt, so kann auch dadurch wieder die Wirkung des Flügelschlages ersetzt werden.

Es muss den in wild bewegter Luft sich tummelnden Fliegern eine staunenswerthe Fähigkeit zugetraut werden, aus den verschiedenen Strömungen Nutzen zu ziehen.

8. Aenderung der Verhältnisse des Fluges bei Aenderung aller Dimensionen des Flugthieres.

Bei Thieren von geometrisch ähnlichem Körperbau, aber verschiedenen Dimensionen verhalten sich die Gewichte P wie die Volumina, die einander entsprechenden Flächen wie $P^{2/3}$, die Längen wie $P^{1/3}$.

Soll bei allen horizontaler Normalflug stattfinden, so müssen die Kräftefelder der verticalen Widerstände wachsen wie P; soll dies nun auch mit den horizontalen Widerständen in entsprechenden Phasen der Fall sein, dann müssen die absoluten Geschwindigkeiten der Flächen gegen die Luft sich in entsprechenden Stellungen verhalten. Die Widerstände wachsen dann wie $P^{1/6}$, (wegen der Geschwindigkeit wie $P^{1/3}$ und wegen der Fläche wie $P^{2/3}$). Es muss sich dabei also die horizontale mittlere Geschwindigkeit des Ganzen ebenfalls wie $P^{1/6}$ verhalten. Daraus folgt dann aber, dass auch die relativen Geschwindigkeiten proportional $P^{1/6}$ sein müssen, und dass die Bewegung „geometrisch ähnlich" bleiben muss. Da entsprechende relative Excursionen sich wie $P^{1/3}$ verhalten, so sind die zu ihrer Durchmessung nothwendigen Zeiten proportional $P^{1/6}$. Ebenso verhält sich die Dauer einer ganzen Periode oder eines Flügelschlages. Die Winkelgeschwindigkeiten aber, oder die Excursionsgeschwindigkeiten der Muskeln im Verhältniss zu ihren Längen sind proportional der Grösse $\frac{P^{1/6}}{P^{1/3}}$ oder $\frac{1}{P^{1/6}}$.

In entsprechenden Phasen müssen sich die Spannungen entsprechender Theile wie P erhalten, und da die Querschnitte nur zu $P^{2/3}$ proportional sind, so wächst die Beanspruchung gleich grosser Elemente auf Spannung wie $P^{1/3}$. Da die sich entsprechenden Phasen sich wie $P^{1/6}$ verhalten, so ist ihre Einwirkung pro Phase proportional $P^{1/6}$; dafür wiederholt sich dieselbe Einwirkung pro Zeiteinheit mit einer Häufigkeit von $\frac{1}{P^{1/6}}$.

Die inneren Kräfte ändern sich also dabei ganz nach dem-

selben Typus wie die äusseren Kräfte. Die locomotorische Leistung sowohl in der verticalen als in der z-Richtung ist proportional P die Muskelarbeit aber verhält sich wie $P^{7/6}$.

Wird angenommen, dass die Muskeln überall gleich gut der Arbeitsleistung angepasst sind, und zwar so, dass z. B. bei grösseren Thieren die Muskeln verhältnissmässig kürzer und dafür dicker sind, dass aber die Muskelmenge nicht stärker wachsen kann als das Körpergewicht P, so würde die Beanspruchung gleich grosser Muskelmengen verschieden sein müssen, wie $P^{1/6}$.

Ganz dasselbe Resultat muss erhalten werden, wenn man irgend eine andere Flugweise zum Ausgangspunkt wählt. Soll die Bewegung bei verschiedenen, geometrisch ähnlich gebauten Thieren ähnlich bleiben, von der gleichmässigen Aenderung der Zeitdauer der sich entsprechenden Phasen abgesehen, so müssen die äusseren Widerstände und die inneren Kräfte sich verhalten wie die Gewichte; die absoluten Geschwindigkeiten wie $P^{1/6}$, ebenso die relativen, die Excursionen wie $P^{1/6}$, die Phasendauer wie $P^{1/6}$, die Arbeiten wie $P^{7/6}$. Dies wurde für das Schweben schon im vorigen Kapitel erörtert; es gilt in ähnlicher Weise für das Steigen, den stationären Flug, kurz für jeden besonderen Typus der Bewegung.

Es ist nun gar nicht zu bezweifeln, dass ganz erhebliche Verschiedenheiten der Muskelsubstanz vorkommen, und zwar nicht blos in der Art, dass das eine Mal die Fähigkeit, Spannung zu leisten, gross und dafür die Verkürzungsfähigkeit klein ist, das andere Mal das Gegentheil zutrifft, sondern auch insofern, als gewisse Muskelsubstanzen überhaupt grössere Arbeit zu leisten vermögen als andre. Doch hat dies seine Grenzen; es ist nicht wohl denkbar, dass im Grossen und Ganzen in der Klasse der Vögel die Arbeitsfähigkeit der Muskelsubstanz wie die 6. Wurzel des Körpergewichtes wächst; dass also z. B. bei einem Fischadler von 2176 Grm. Gewicht die Arbeitsfähigkeit der Muskelsubstanz auf die Dauer doppelt so gross sein könnte, als bei einem 64 mal kleineren Vogel, z. B. einem Sperling von 33 Grm. Gewicht. Jedenfalls muss früher oder später die Grenze einer derartigen Verbesserungsfähigkeit der Muskelsubstanz erreicht sein.

Aus diesen Ueberlegungen ergiebt sich Folgendes mit Sicherheit:

1) dass das relative Flugvermögen mit zunehmender Körpergrösse und wachsendem Körpergewicht bei gleich günstigem Bau und möglichst ähnlicher Weise des Flügelschlages abnehmen muss,

2) dass bei einem gewissen Maximum der Dimensionen der

Flug mit Apparaten, welche nach demselben Princip gebaut und bewegt sind, überhaupt nicht mehr möglich ist.

Dabei ist unter relativem Flugvermögen verstanden:

a) Die Befähigung zum horizontalen Normalflug nach Ausdauer und Geschwindigkeit. Ein Mass dieser Befähigung ist z. B. die mittlere Geschwindigkeit, mit welcher sich der Vogel bei anhaltendem Fluge, z. B. bei den Wanderungen gegenüber dem umgebenden Medium horizontal fortzubewegen vermag: angegeben in Metermass und dividirt durch $P^{1/6}$, wobei das Gewicht etwa in Gramm anzugeben wäre.

b) Die Befähigung zu Extraleistungen. Dieselbe ist nicht so genau durch Maasse bestimmbar. Man könnte z. B. als Mass hierfür die Geschwindigkeit wählen, mit welcher die Thiere in demselben bestimmten steilen Winkel aufzusteigen vermögen, dividirt durch $P^{1/6}$, oder die maximale Spannung, reducirt auf die ε-Tangentenebene ihres Flügels, mit welcher sie den Flügel gegenüber dem Rumpf festzuhalten vermögen, dividirt durch P, oder das Verhältniss der maximalen Horizontalgeschwindigkeit, deren sie fähig sind zur mittleren (oder vielleicht ein Mehrfaches oder eine Potenz oder irgend eine bestimmte Funktion dieses Verhältnisses). Am richtigsten aber ist es, wenn man allen diesen Verhältnissen zusammen Rechnung trägt und nur immer berücksichtigt, dass zum gleichen relativen Flugvermögen ein Verhalten der Geschwindigkeiten wie $P^{1/6}$ gehört.

Dasselbe Missverhältniss zwischen der Zunahme der Grösse des Apparates und der Anzahl von Motoren, welche in ihm Platz finden, einerseits, und andererseits der Zunahme der Arbeit, welche nothwendig ist, damit auch jetzt noch dieselbe Locomotionsform möglich ist, besteht überall da, wo irgend ein Theil der äusseren Kräfte nicht bloss eine Funktion der Oberflächengeschwindigkeit ist, sondern eine Funktion der Masse. Bei einem Locomotionsapparat, der mitten im Wasser oder in der Luft schwimmt und mit dem umgebenden Medium dasselbe spezifische Gewicht hat, wirken als äussere Kräfte nur Widerstände ein; würde hier die Geschwindigkeit der Oberflächen nur wachsen wie die 12. Wurzel der Masse M, der Widerstand also dann wie $M^{5/6}$, und die relativen Excursionen wie $M^{1/12}$, so würden die Spannungen der inneren Kräfte nur wie $M^{5/6}$ zuzunehmen brauchen, Muskelarbeit und Muskelmenge nur wie $M^{11/12}$. Es würde also die Geschwindigkeit der Vorbewegung mit zunehmenden Dimensionen absolut immer noch um etwas mehr als proportional $M^{1/12}$ wachsen

können. Der Entwicklung riesiger Wasserthiere mit erheblicher absoluter Geschwindigkeit steht also in dieser Hinsicht nichts im Wege; ebensowenig der Vergrösserung der durch statischen Druck schwebend gehaltenen Luftschiffe und der gleichzeitigen Steigerung ihrer absoluten Geschwindigkeit.

Es kann nun zwar bei der Ortsbewegung spezifisch schwererer Apparate, z. B. der Vögel in der Luft mit wachsenden Dimensionen auf die Zunahme der Horizontalgeschwindigkeit im Verhältniss von $P^{1/6}$ verzichtet werden. Ja man könnte sich denken, dass die Geschwindigkeit geradezu vermindert wird; aber dies kann doch nur bis zu einer gewissen Grenze mit Vortheil geschehen, nehmen wir an bis 0, wo dann also die ganze disponible Muskulatur zum Verbleib in demselben Niveau verwendet wird. Von jetzt an ist sicher auch hier keine weitere Vergrösserung der Dimensionen ohne gleichzeitige Vergrösserung der Arbeitsfähigkeit nach $P^{1/3}$ denkbar.

Diese Auseinandersetzungen bestätigen nur das, was Helmholtz schon vor Jahren in einem inhaltsreichen Aufsatze entwickelt hat [1]). Ich erlaube mir, seine Schlussfolgerungen hier zu wiederholen [2]):

„Daraus geht hervor, dass die Grösse der Vögel eine Grenze

---

[1]) Helmholtz. Ueber ein Theorem, geometrisch ähnliche Bewegungen fliessender Körper betreffend nebst Anwendung auf das Problem, Luftballons zu lenken. (Monatsber. d. Berliner Akademie 1873. 26. Juni).

[2]) Ich darf hier nicht verschweigen, dass ich vor Jahren (Ueber die Luftsäcke der Vögel. 1877. In.-Diss.) (Morphol. Jahrb. III.), um die grossen Schulterlufträume bei grossen guten Fliegern und die im Vergleich zum Flügel- und Rumpfvolum verhältnissmässig klein erscheinende Muskelmenge zu erklären, den Nachweis versucht habe, dass mit steigendem Körpergewicht bei sonst ähnlichen Verhältnissen die zum Schwebenderhalten nothwendige Muskelmenge abnehmen dürfe. Der Aufsatz von Helmholtz ist mir erst später zu Gesicht gekommen, als ich schon lange das Irrige dieses Nachweises eingesehen hatte. Es ist zwar von mir (auf S. 218) ganz richtig erörtert worden, wie mit der Aenderung der Dimensionen die Bewegung des Apparates abändern muss; das aber, was auf S. 219 über die Kräfte und Arbeitsleistung gesagt und was weiter daraus gefolgert wurde, muss als fehlerhaft bezeichnet werden. Es wird sich aus dem Folgenden ergeben, dass die thatsächlichen Unterschiede in der Anordnung der Muskeln und in der Ausbildung der Pneumatisation sich aus anderen Gründen, ohne die genannte fehlerhafte Annahme sehr gut verstehen lassen.

hat, wenn nicht die Muskeln in der Richtung weiter ausgebildet werden, dass sie bei derselben Masse noch mehr Arbeit leisten können. Gerade unter den grossen Vögeln, welche grosser Leistungen im Fliegen fähig sind, finden wir nur Fleisch- und Fischfresser, also Thiere, welche concentrirte Nahrung zu sich nehmen und keiner ausgedehnten Verdauungsorgane bedürfen. Unter den kleineren sind auch viele Körnerfresser, wie die Tauben und kleinen Singvögel gute Flieger. Es erscheint deshalb wahrscheinlich, dass im Modell der grossen Geier die Natur schon die Grenze erreicht hat, welche mit Muskeln als arbeitsleistenden Organen und bei möglichst günstigen Bedingungen der Ernährung für die Grösse eines Geschöpfes erreicht werden kann, welches sich durch Flügel selbst heben und längere Zeit in der Höhe erhalten soll. Unter diesen Umständen ist es kaum als wahrscheinlich zu betrachten, dass der Mensch auch durch den allergeschicktesten flügelähnlichen Mechanismus, den er durch seine eigene Muskelkraft zu bewegen hätte, in den Stand gesetzt werden würde, sein eigenes Gewicht in die Höhe zu heben und dort zu erhalten".

Wir sind nun durch die vorangegangenen Untersuchungen in den Stand gesetzt, noch etwas mehr ins Einzelne hinein zu beurtheilen, welche Modificationen des Flugapparates und der Flugweise besonders geeignet sind, die Anforderungen an die Grösse und den Stoffumsatz der Muskulatur einzuschränken. Je grösser das Flugthier, desto mehr wird es im Allgemeinen gezwungen sein, von diesen Einrichtungen Gebrauch zu machen.

Vor Allem kommt, abgesehen von einer allfälligen Verbesserung der Arbeitsfähigkeit der Muskelsubstanz, in Betracht:

a. Die Vermeidung von besonders grossen Extraleistungen der Spannung, Excursion und Excursionsgeschwindigkeit. Das Aufsteigen durch Flügelschlag geschieht im Allgemeinen in um so weniger steiler Bahn, die verticale Geschwindigkeit ist im Verhältniss zu $P^{1/6}$ um so geringer, je grösser das Flugthier ist; beim horizontalen Fluge sind die maximalen Geschwindigkeiten im Verhältniss zur gewöhnlichen geringer beim grösseren Flugthier. Ja es finden sich sogar die grössten absoluten Geschwindigkeiten des horizontalen Fluges eher bei der Schwalbe, den Tauben, dem Falken, als bei den grossen Geiern, Adlern, Kranichen u. s. w. Kein grosser Flieger hat meines Wissens die Fähigkeit oder Gewohnheit, rüttelnd an derselben Stelle zu bleiben. Beim Schweben

werden rasche Wendungen bei grosser Geschwindigkeit vermieden; aus demselben Grunde geschieht auch das Absteigen in mehr horizontaler Linie, mit mehr gleichmässiger Geschwindigkeit, zu Anfang namentlich mit grösserem Supinationswinkel (gegenüber dem Trajectorium) u. s. w.

b. Einschränkung der mittleren horizontalen Geschwindigkeit des Ruderfluges.

c. Möglichste Grösse der Flügel bei möglichst geringem Flügelgewicht. (Pneumaticität).

d. Möglichste Beschränkung der Massenentwicklung der nicht unmittelbar der Locomotion dienenden Organe, wie dies von HELMHOLTZ hervorgehoben wurde[1]).

e. Möglichste Benutzung der Luftströmungen zum Schweben und Kreisen.

Was die Verhältnisse der Flügelgrösse und des Flügelgewichts betrifft, so muss zunächst untersucht werden, wie beim Wachsthum der Widerstände nach P und bei einer Vergrösserung der Flügelfläche nach $P^{2/3}$ die Ansprüche an die Festigkeit und an das Gewicht des Flügels sich ändern. An correspondirenden Theilen des Flügels wächst der mittlere und maximale Druck wie P, pro Flächenelement wie $P^{1/3}$. Alle Entfernungen wachsen wie $P^{1/3}$.

Die Torsions- und Biegungsbeanspruchung wächst an entsprechenden Schnittebenen wie $P.P^{1/3}$; der Torsions- und Biegungswiderstand bei ähnlicher Materialvertheilung an denselben nur wie P; die Scheerungsbeanspruchung wächst dabei wie P, die Scheerungsfestigkeit wie $P^{2/3}$, doch ist letztere wohl lange noch hinreichend. Mit demselben Material kann also der Flügel nur genügend festgemacht werden, wenn dieses Material möglichst in den Richtungen der grössten Zusammenschiebung und Dehnung des Organs in Druck- und Zugtrajectorien angeordnet ist, und wenn diese zwei Arten von Trajectorien sich möglichst weit im Querschnitt von einander entfernen; Federspulen und Knochenröhren müssen also verhältnissmässig weiter werden. Aehnliches muss im Kleinen an den Federstrahlen stattfinden. Das Skelet wird voluminöser.

---

[1]) S. auch den interessanten Aufsatz von C. BERGMANN. Physiologische Bemerkungen über einige bekannte Eigenthümlichkeiten der Vögel. Müller's Arch. f. Anat. 1850. pg. 365—381.

Die annähernd vollkommene Vermeidung einer relativen Gewichtszunahme wird nur dadurch möglich, dass Luft in das Innere der Gebilde dringen kann. Solches geschieht bekanntlich an den Federspulen durch eigene Oeffnungen; von der Schulter aus, wo ein Luftsack dem Humerus anliegt, dringt dieser zwischen schwindenden oder auseinander weichenden Theilen der Compacte hindurch in die Markräume des Knochens und breitet sich daselbst aus, während das Mark resorbirt wird. An dem Humerus vorbei oder durch ihn hindurch gelangt der Luftraum in die Ellenbeuge, von da zum Vorderarm und zur Hand. Eine so grosse Ausdehnung gewinnen die Lufthöhlen bekanntlich nur bei den grossen, verhältnissmässig guten und grossflügeligen Fliegern [1]).

So ist bei Pelicanen, Schwänen, Geiern, Kranichen, doch auch bei den kleineren Tukanen und Nashornvögeln u. s. w. zuletzt das ganze Flügelskelet bis zum äussersten Ende hinaus pneumatisirt [2]).

Durch die Möglichkeit des Nachdringens von Luft wird nun auch der Vortheil einer weiteren, relativen Vergrösserung des Flügels bis zu einer gewissen Grenze der Vergrösserung gesichert. (S. das 3. Kapitel dieses Haupttheils der Schrift). Dieser Vortheil kann vorhanden sein, obschon dabei das Gewicht des Flügels etwas zunimmt.

So versteht man, warum bei grösseren guten Fliegern das Flügelgewicht verhältnissmässig gross ist. Man übersieht leicht die relative Vergrösserung des Flügels im Verhältniss zum Gesammt- oder Rumpfgewicht, weil sie meist von einer relativen Expansion des Rumpfes begleitet ist, aus Gründen, welche gleich besprochen werden sollen.

Der Einfluss aller dieser günstigen Umstände kann nun, wie leicht nachzuweisen ist, nur bis zu einer gewissen Grenze gesteigert werden, die wirklich allem Anschein nach beim Condor bereits annähernd erreicht ist. Mit zunehmenden Dimensionen steigert sich also die Schwierigkeit überhaupt zu fliegen, d. h. sich durch locomotorische Thätigkeit in der Luft zu halten, und es ist eine grössere Kunst und grössere Besonderheit der Organisation dazu nöthig; bei kleinen Thieren genügen dazu kleinere

[1]) S. Nitsch. Osteographische Beiträge. Strasser. Ueber die Luftsäcke der Vögel. Morpholog. Jahrb. III. 1877.

[2]) Bei Diomedea exulans scheinen die Knochenröhren nach einem etwas anderen Typus verhältnissmässig schlank zu bleiben; dafür aber haben sie einen ausserordentlich festen Bau.

Muskeln, kleinere Flugflächen u. s. w. bei derselben Arbeitsfähigkeit. Es ist demnach mehr als wahrscheinlich, dass es kleine Thiere gewesen sind, welche zuerst in der Geschichte der Thierwelt und der einzelnen Thierstämme die Fähigkeit zu fliegen gezeigt haben.

Es wird diese Meinung nicht durch die Thatsache widerlegt, dass sich in denselben geologischen Schichten mit den Zahnvögeln Amerikas gigantische Flugsaurier gefunden haben, die zum Theil eine Flügelspannweite von nahezu 25 Fuss besessen haben müssen.[1]) Vermochten diese Riesen im wahren Sinne des Wortes zu fliegen, was kaum der Fall war, so konnten ihnen flugfähige Ahnen von kleinerem Wuchs vorausgegangen sein. Was die Vögel betrifft, so fehlt in den Schichten unterhalb der oberen Kreide bis jetzt jede Spur eines grösseren guten Fliegers. Der grösste, Ichthyornis, mochte kaum grösser als eine Taube gewesen sein, Archäopterix hatte etwa die Grösse einer Holztaube oder Krähe. Immerhin wäre es möglich und würde die oben ausgesprochene Vermuthung durchaus nicht haltlos machen, dass auch in diesen alten Schichten noch dereinst grosse Flugvögel gefunden werden, die sogar unseren Condor an Grösse noch übertreffen. Man darf dabei nicht vergessen, dass die grössere oder geringere Schwierigkeit des Nahrungserwerbes von Bedeutung ist für die Grenze, bis zu welcher die Bewegungsgeschwindigkeit ohne Schaden eingeschränkt werden kann. Bei besonderer Leichtigkeit, die Nahrung aus der Nähe zu beschaffen, konnten Geschwindigkeit und Ausdauer der Bewegung vermindert, die Arbeitsfähigkeit (und Stoffwechselgrösse) der Muskelsubstanz im Verhältniss zur Muskelmenge vermehrt sein.

Es waren jeweilen kleine Thiere, welche das Fliegen erfunden haben. Zugleich aber müssen es sehr bewegliche, durch grosse Raschheit der Muskelverkürzung ausgezeichnete Geschöpfe gewesen sein. Zu diesem Schlusse gelangen wir, wenn wir die nothwendigen Aenderungen in der Qualität und Vertheilung der Muskulatur ins Auge fassen, die mit einer Aenderung der Dimensionen bei ähnlich bleibender Locomotionsform verknüpft sein muss, — immer vorausgesetzt, dass die Muskeln die zu leistende Arbeit möglichst ökonomisch leisten. —

[1]) R. Wiedersheim. Ueber die Vorfahren der heutigen Vögel. Humboldt Bd. IV. Heft 6.

Es wurde oben dargethan, dass bei ähnlichem Bau und ähnlich bleibender absoluter und relativer Bewegung der Flugthiere die relativen Geschwindigkeiten sich wie $P^{1/6}$ oder im Verhältniss zur Länge des Thieres wie $\frac{1}{P^{1/6}}$ verhalten müssen. Die Spannungen aber (in der ε-Tangentenebene) müssen zu P proportional sein, oder im Verhältniss zu einander entsprechenden Querschnittsflächen wie $\frac{P}{P^{2/3}} = P^{1/3}$ sich verhalten.

Lassen wir es dahingestellt, ob bei grösseren Dimensionen die nothwendige relative Vergrösserung der Muskelmenge stattfindet oder nicht; jedenfalls muss sich das Verhältniss der Muskelquerschnitte zu den Muskellängen, oder das Verhältniss der Anheftung, oder es muss sich der innere Bau der Muskeln ändern. In dieser Beziehung kommen folgende Wege der Anpassung in Betracht:

1. Die Anordnungsweise und Form der Muskeln im Ganzen und die Richtung der Fasern im Innern der Muskeln bleibe möglichst unverändert. Gleichmässige Vergrösserung aller Dimensionen finde statt. Dann muss die Qualität der Substanz im Sinne einer Vermehrung der Leistungsfähigkeit für Spannung und einer Verminderung der maximalen Verkürzungsgeschwindigkeit sich ändern.

2. Es kann die Richtung der Fasern sich ändern im Sinne einer grösseren Parallelstellung der Fasern zu einander und zu der resultirenden Zugrichtung, bei gleichbleibender Länge und Zahl der Fasern. Schlanke, lange, schrägfaserige Muskeln werden dadurch in kürzere, dickere, mehr parallelfaserige Muskelkörper verwandelt [1]).

3. Bei ähnlicher Anordnung der Muskeln im Ganzen, ähnlicher Richtung der Fasern im Einzelnen wird die Länge der Fasern weniger, und die Zahl stärker vermehrt, wobei ebenfalls die Form der ganzen Muskeln geändert wird.

4. Die Hebelarme der Muskeln ändern sich statt nach $P^{1/3}$ in besonderer Weise. Es rücken z. B. mit wachsenden Dimensionen die Muskeln relativ vom Gelenk weg, sei es dass nur die Ursprünge der Muskeln am Rumpf oder Ursprung und Ansatz im Verhältniss zu der Länge des Flügels (oder dem Abstand $o\varepsilon$) vom Gelenk sich entfernen. Bleibt die Form und Structur des

[1]) Strasser, Zur Kenntniss der functionellen Anpassung der quergestreiften Muskeln, pg. 44 ff.

Muskelbauches im Uebrigen eine ähnliche, so hat eine solche Umlagerung bei sonst gleichen Verhältnissen eine bessere Ausnützung der Muskellänge und eine verminderte Beanspruchung des Muskelquerschnittes zur Folge.

5. Diese 4 Momente könnten auch in beliebiger Weise miteinander combinirt wirken.

Bei Verkleinerung aller Dimensionen muss umgekehrt die Anpassung der Muskulatur in der entgegengesetzten Richtung vor sich gehen. Mit den Aenderungen 2, 3 und 4 müsste natürlich eine Aenderung des Excursionscoefficienten der Fasern verbunden sein, vorausgesetzt, dass der Schlagwinkel derselbe bleibt.

a Grenzen dieser Aenderungen beim Wachsthum der Dimensionen.

Ueber die Grenzen der Umänderungsfähigkeit der Qualität mit oder ohne Abänderung des Excursionscoefficienten will ich keine Vermuthungen äussern. Die Richtung der Fasern kann jedenfalls nicht mehr nützlich verändert werden, als bis die Fasern Parallelstellung mit einander haben und mit der resultirenden Zugrichtung parallel gestellt sind. Die Verdickung der Muskeln findet ihre Beschränkung durch die Beschränktheit der Ansatz- oder Ursprungsflächen, die ja bei ähnlichem Wachsthum aller Dimensionen des Skeletes nach $P^{1|s}$ nur wie $P^{2|s}$ wachsen; etwas günstiger liegen die Verhältnisse, wenn das Flügelvolum stärker als P wächst, und ebenso, wenn Aehnliches beim Rumpf der Fall ist.

Man versteht aber, dass wegen der Beschränktheit aller dieser Veränderungen auch noch die vierte Möglichkeit ausgenutzt werden muss, um so mehr, je grösser P ist.

Ein Abrücken der Muskeln vom Gelenk, eine stärkere Vergrösserung der Hebelarme, als dem Wachsthum von $P^{1|s}$ entspricht, wird ermöglicht, wenn die Dimensionen des Rumpf- oder des Flügelskeletes oder beider zugleich ebenfalls in stärkerem Masse als $P^{1|s}$ wachsen, ferner aber durch ein wirkliches Wegwandern der Ansatzflächen vom Gelenk oder durch Vorwachsen der Leisten und Fortsätze, an denen die Muskeln entspringen und sich ansetzen. (Furcula, crista sterni, Fortsätze des Humeruskopfes).

Thatsächlich liegen nun gerade bei den grossen guten Fliegern die Muskeln der Schulter weiter auseinander (Anpassungsmöglichkeit Nr. 4); ferner scheinen die Muskelsehnen verhältniss-

mässig länger zu sein (Anpassungsmöglichkeit 2 oder 3); daraus würde folgen, dass der Excursionscoefficient wirklich mit zunehmender Grösse eine Aenderung erfährt. Andererseits ist nicht ausgeschlossen, dass auch noch eine Abänderung der Qualität (im Sinne der Anpassungsmöglichkeit 1) eine Rolle spielt. Es werden sehr sorgfältige Untersuchungen nothwendig sein, um dies zu eruiren.

Auch der Vortheil des Abrückens der Muskeln vom Gelenk würde bald seine Grenze finden wenn die dabei nothwendig vergrösserten Zwischenräume zwischen den Muskeln und dem Gelenk und zwischen den Muskeln untereinander, die ihre Form natürlich bei der Aktion von Moment zu Moment ändern müssen, durch eine tropfbar flüssige oder feste, nicht leicht ausweichende Ausfüllungsmasse eingenommen würden. Die Möglichkeit, dass Luftsäcke in die beim expansiven Wachsthum entstehenden Zwischenräume nachdringen, ist daher für die Entwicklung grösserer Flugthiere von der allergrössten Bedeutung. Die mit Luft erfüllten Zwischenräume zwischen den Mukeln der Schulter communiciren mit Nachbarhöhlen und mit den grossen Lufträumen im Innern der Brust und können ohne nennenswerthen Widerstand in ihrer Form verändert, vergrössert und verkleinert werden. Es ist nun vollkommen verständlich, dass diese Lufträume der Schulter gerade bei den grössten Fliegern die verhältnissmässig grösste Ausdehnung haben. (Abrücken der Muskeln vom Gelenk ist übrigens wohl auch in vielen anderen Fällen als gerade beim Fluge aus ähnlichen Gründen von Vortheil, und zwar in besonderem Maasse, wenn die Interstitien von Luftsäcken in Beschlag genommen werden können).

Ich habe diese Ansichten zum Theil schon in meiner Schrift „Ueber die Luftsäcke der Vögel [1])" geltend gemacht. Ich habe dort, und wie ich glaube mit vollem Recht, die Ansicht vertreten, dass die Hauptbedeutung der Pneumatisation darin liegt, dass durch sie ein expansiveres Wachsthum der Theile möglich resp. nützlich gemacht wird. Ein stark pneumatisirter Geier z. B. ist also hinsichtlich der Menge seiner eigentlichen activen, animalischen Substanzen nicht gleichwerthig einem gleich grossen, ja nicht einmal einem gleich schweren Reptil oder Säugethier, sondern einem erheblich kleineren, ja etwas leichteren. Es sind gleichsam nur bei ihm die einzelnen Balken und Wände

[1]) Morpholog. Jahrb., III. 1877.

des Baues weiter auseinandergerückt. Wenn dabei auch eine gewisse Summe stützender Substanz mehr gebraucht wird, und zur Gewichtsvermehrung beiträgt, so wird dieser Nachtheil mehr als compensirt durch die damit erworbene Fähigkeit, die vorhandenen Kräfte zur Ortsbewegung besser zu verwerthen.

b. Grenze der Anpassungsmöglichkeit bei Verkleinerung der Dimensionen.

Für die Verkleinerung der Dimensionen liegt die Hauptschwierigkeit in der nothwendig werdenden verhältnissmässigen Zunahme der Excursionsgeschwindigkeit der Muskeln bei ähnlicher Anordnung.

Die Verschmälerung und Verlängerung der Muskeln kann hier nicht weiter gehen, als bis sie den Zwischenraum zwischen Ursprung und Ansatz gänzlich ausfüllen und keine freie Sehne mehr vorhanden ist; die Schrägstellung der Fasern zur Zugrichtung kann eine gewisse Grenze nicht überschreiten, die Annäherung der Muskeln an das Gelenk nicht weitergehen, als bis die Muskeln nahe am Gelenk zu einer fast continuirlichen Masse zusammengedrängt sind. Wirklich zeichnen sich kleine Flieger durch das maximale Ausgenutztsein dieser Verhältnisse aus. Alle diese Umänderungen müssen vor sich gehen auch bei gleichbleibendem Schlagwinkel, müssen also mit einer Aenderung (Verkleinerung) des Excursionscoefficienten verbunden sein. Eine weitere Verkleinerung der Dimensionen ist schliesslich aber nicht denkbar, ohne Verbesserung der Geschwindigkeit der möglichen Verkürzung bei gleich bleibendem Excursionscoefficienten. Da nun im Stoffverbrauch, in der Muskelmenge, im Querschnitt der Muskulatur um so weniger gespart zu werden braucht, je kleiner die Dimensionen des Apparates sind, so scheint die Verbesserungsmöglichkeit der genannten Qualität wirklich eine sehr erhebliche sein zu können.

Alle diese im Vorigen besprochenen Verschiedenheiten der Muskelqualität und Muskelanordnung bei kleinen und grossen Fliegern sind bis jetzt eigenthümlicher Weise unbeachtet geblieben. Man hat beobachtet, dass die Contractionsgeschwindigkeit bei den Muskeln der Insekten ausserordentlich gross ist, ohne anzugeben, warum dem so sein muss; es hat auch bis jetzt meines Wissens Niemand darauf hingewiesen, dass auch bei den Vögeln

mit der Verkleinerung der Dimensionen eine Zunahme der relativen Verkürzungsfähigkeit verbunden ist, und warum es der Fall sein muss.

Was die Verkleinerung des Excursionscoefficienten entsprechend der Verkleinerung des Flugthieres betrifft, so will ich zum Schluss das Resultat einer kleinen Untersuchung mittheilen, die als Vorläufer einer grösseren Untersuchungsreihe zu betrachten ist.

Bei einer Möve, welche 130 cm weit klafterte, wurde der ausgestreckte Flügel so gegenüber dem Rumpf hin und her geführt, dass die Sagittalprofile des Flügeldreieckes der Längslinie des Rumpfes parallel blieben, die Flügellängslinie aber stets nur um denselben kleinen Betrag aus der Querebene des Rumpfes (Schulter) in adductorischem Sinn abwich.

War der Flügel auf diese Weise so weit als möglich ventralwärts geführt, so zeigte sich für die oberflächlichsten Muskelfasern aus der Mitte des Musc. pectoralis eine Annäherung der Anheftungspunkte gegeneinander bis auf die Distanz von 34 mm, bei naturgemässer Anspannung der Sehnen; wurde aber der Flügel aus dieser Stellung um 90° gehoben, so betrug die Entferung jener Anheftungspunkte 62 mm. Bei einer grossen Möve machen also an Muskelfasern von 34 mm kürzester Länge die Endpunkte bei einem Flügelniederschlag von 90° verticalem Schlagwinkel, eine Excursion von 28 mm. Jedes Längentheilchen verkürzt sich fast auf die Hälfte seiner Länge, vielleicht binnen $\frac{1}{6}$ Secunde.

Bei einem Todtenkopf (Acherontia atropos) wurde eine ähnliche Untersuchung angestellt. Der maximalen Tiefstellung des Flügels entsprach hier eine maximale Verkürzung des im Innern der Thoraxsegmente zunächst der Mittellinie gelegenen, mächtigen, schräg vorwärts aufsteigenden Muskels; die Länge der Fasern betrug dann 14 mm; wurde der Flügel um 90° gehoben, so rückten die Ansatzpunkte der Fasern höchstens bis auf eine Entfernung von 17 mm auseinander.

Bei diesem Schmetterling sind also ohne Zweifel bei jedem Flügelschlag die Excursionen der Muskelfasern im Verhältniss zu ihrer grössten, ihrer mittleren oder ihrer kleinsten Länge geringer als bei der Möve. Der Excursionscoefficient ist wirklich kleiner. Jedes Längentheilchen verkürzt sich um nicht viel mehr als um $\frac{1}{6}$ statt um $\frac{1}{2}$. Doch ist die hierzu verbrauchte Zeit nicht etwa bloss 3 mal, sondern sehr viel mal kürzer.

Der Todtenkopfmuskel ist also befähigt, gleich grosse relative Excursionen viel rascher auszuführen als der Mövenmuskel. Seine

Qualität muss auch noch, abgesehen von dem kleineren Excursionscoefficienten, von derjenigen des Mövenmuskels verschieden sein. Der grösseren Leistungsfähigkeit für Längenänderung entspricht aber wahrscheinlich eine geringere Leistungsfähigkeit für Spannung.

Die analoge Untersuchung bei einem Cypselus apus ergab folgendes Resultat:

Kürzeste Entfernung der Faserenden von einander bei maximaler Flügelsenkung: 25 mm,

Abstand bei Hebung aus dieser Stellung um 90°: 35 mm,

Excursion: 10 mm. Bei Cypselus ist also der Excursionscoefficient grösser als bei Acherontia, kleiner als bei der Möve.

9. Untersuchungen über die thatsächlichen Abänderungen der Flugverhältnisse und Flugapparate.

Es ist ein ganz natürlicher Gang der Entwicklung, wenn in der Lehre von den Flugbewegungen und Flugorganen abwechselnd theoretische Ueberlegungen zu empirischen Untersuchungen Anlass gegeben, und diese wieder zu neuen theoretischen Betrachtungen geführt haben. So hoffe ich denn auch von der vorliegenden Schrift, dass sie ermöglichen wird, neue Messungsreihen von verbesserten Gesichtspunkten aus zu unternehmen. Ein Rückblick auf die letzten Arbeiten auf diesem Gebiete wird deshalb zum Schluss wohl am Platze sein.

Es ist bekannt, dass DE LUCY[1]) Untersuchungen über das Verhältniss $\frac{F}{P}$ bei Insekten, Vögeln und Fledermäusen angestellt hat und als merkwürdiges Resultat eine Abnahme dieses Verhältnisses mit zunehmendem Körpergewicht fand. HARTING[2]) hat diese Thatsache „ihrer Sonderbarkeit entkleidet", indem er zeigte, dass „das, was DE LUCY durch mühsame Messungen erfuhr, nichts anderes ist, als eine Consequenz der aus der Anschauung Jedem bekannten Thatsache, dass im Grossen und Ganzen eine gewisse geometrische Aehnlichkeit zwischen den Körpern grosser und kleiner Flieger besteht" (REICHEL und LEGAL).

HARTING selbst und nach ihm MAREY[3]) haben statt dessen

---

[1]) DE LUCY, Du vol chez les oiseaux, les chéiroptères et les insectes. Presse scientifique des deux mondes. 1865. tome I. pg. 581.

[2]) HARTING, Archives néerlandaises. t. IV, pg. 33.

[3]) MAREY, La machine animale pg. 234.

das Verhältniss $\frac{F^{1/3}}{P^{1/3}}$ oder ein gleichwerthiges ermittelt als Ausdruck der relativen Flügelgrösse.

Es ist nicht zu bezweifeln, dass die genannten Autoren den vom Flügel erzeugten Widerstand als hauptsächlich massgebend angesehen haben. Derselben Ansicht waren auch REICHEL und LEGAL, die neben vielen anderen Beziehungen auch die in Rede stehende untersucht haben [1]).

MOUILLARD [2]) und MÜLLENHOFF [3]) glauben dem gegenüber einen grossen Fortschritt gemacht zu haben, indem sie nicht bloss die Ausdehnung der Flügelflächen, sondern der ganzen, beim Schweben als Drachenfläche wirkenden Unterfläche von Rumpf und Flügel als die für den Flug massgebende Flugfläche ansehen. MOUILLARD untersuchte das Verhältniss dieser Drachenfläche, die wir mit D bezeichnen wollen, zum Körpergewicht, also $\frac{D}{P}$ und fand natürlich, wie DE LUCY für $\frac{F}{P}$, im Allgemeinen eine Verkleinerung des Quotienten bei wachsendem Körpergewicht.

MÜLLENHOFF berechnete das Verhältniss $\frac{D^{1/3}}{P^{1/3}}$ und bezeichnet es als Segelvermögen $= \sigma$. Sicher sind seine ausserordentlich zahlreichen Messungen als Material zur Beurtheilung eines bestimmten Verhältnisses von dem grössten Werth; auch kann man sehr wohl die Thiere nach dieser Segelgrösse klassificiren, so gut als nach irgend einer andern Beziehung.

Auch kann man diese relative Grösse der Drachenfläche insofern als ein Mass für die Fähigkeit zum Segeln ansehen, als Thiere von gleichem Körpergewicht je nach der relativen Grösse von D mit grösserer oder geringerer Oeconomie zu schweben im Stande sind, und als es wahrscheinlich ist, dass sie es je

---

[1]) P. REICHEL und E. LEGAL, Ueber die Beziehungen der Grösse der Flugmuskulatur sowie der Grösse und Form der Flügelfläche zum Flugvermögen und über die Aenderung dieser Beziehungen bei Aenderung des Körpergewichtes.

(Bericht der naturwiss. Sect. d. Schlesischen Ges. f. vaterländ. Cultur 1879).

[2]) MOUILLARD, L'empire de l'air. Essai d'ornithologie appliqué à l'aviation. Paris 1881.

[3]) MÜLLENHOFF, Die Grösse der Flugflächen. PFLÜGER's Archiv f. d. ges. Physiologie. Bd. XXXV. 1884.

nachdem häufiger oder weniger häufig zu thun pflegen. Doch hängt letzteres auch noch von der disponibeln Muskulatur ab. Bei verschieden schweren Thieren aber kann das Verhältniss $\frac{D^{1/2}}{P^{1/3}}$ genau dasselbe sein, und doch wird das eine Thier mit Vortheil und häufig, das andere aber selten schweben. In der That wenn man die Tabelle II von MÜLLENHOFF aufmerksam durchgeht, wird man finden, dass die Gewohnheit zu schweben durchaus nicht etwa mit steigendem σ regelmässig zunimmt; viel mehr wäre dies der Fall, wenn die Thiere nach σP oder vielleicht nach $\sigma.P^{1/6}$ geordnet wären. Um aber über die ganze Flugfähigkeit Aufschluss zu geben, dafür ist σ ebenso wenig als etwa das Verhältniss $\frac{F^{1/2}}{P^{1/3}}$ für sich allein geeignet, da jene Fähigkeit auch noch von anderen Umständen abhängt; auch enthält die Drachenfläche zwei verschiedene Theile, welche beim Fliegen vermittelst Flügelschlägen von recht verschiedener Bedeutung sind. So ist denn MÜLLENHOFF bei seiner Classification der Vögel nach dem Segelvermögen gezwungen, auch noch anderen Verhältnissen, z. B. der relativen Grösse der Brustmuskulatur, der relativen Flügellänge und der Klafterbreite Rechnung zu tragen.

MÜLLENHOFF erhebt gegen REICHEL und LEGAL auch noch den Vorwurf, sie hätten bei der Berechnung der von dem Flügel gegenüber dem Luftwiderstand geleisteten Arbeit die irrige Voraussetzung gemacht, dass der Schlagwinkel und die Schlagfrequenz bei grossen und kleinen Fliegern derselbe sei. Dieser Vorwurf ist ungerechtfertigt.

REICHEL und LEGAL haben der Grösse $\frac{(Fl^2)^{1/4}}{P^{1/3}}$, die sie als Flügelziffer bezeichnen, „versuchsweise" eine eben so grosse Bedeutung für das Flugvermögen zugeschrieben als dem Verhältniss der Muskulatur p zum Körpergewicht (s. pg. 21 unten); sie gingen dabei von der Anschauung aus, dass nicht bloss ein grosser, sondern auch ein verhältnissmässig langer Flügel von besonderem Vortheil sei, weil er eine kleinere Winkelgeschwindigkeit zulasse und damit einen kleineren Schlagwinkel erlaube und indem er eine geringere Muskelverkürzungsgeschwindigkeit bei sonst gleichen Verhältnissen möglich mache. Es wird ausdrücklich gesagt (S. 16), dass bei sonst gleichen Verhältnissen der grössere Flügel langsamer, mit kleinerem Schlagwinkel und kleinerer Winkelgeschwindigkeit bewegt werde. Dieser Vortheil ist durchaus nicht

etwa, wie MÜLLENHOFF meint, taxirt nach dem Verhältniss zwischen den Arbeiten, welche die Flügel bei demselben Schlagwinkel und derselben Zeit des Flügelschlages zu leisten vermögen, und der Arbeit, welche geleistet werden muss — in diesem Falle hätte die Flugziffer $= \frac{F.l^2 l}{P^{1|s}}$ gesetzt werden müssen — es ist der Vortheil vielmehr nur dem Verhältniss einer bestimmten Längendimension des Körpers, welche zwischen der „theoretischen" Länge l des Flügels und der Seite eines Quadrates von der Grösse der Flügelfläche zwischen inne liegt, zu der Grösse $P^{1|s}$ proportional gesetzt worden. Setzen wir nämlich

$$a = \sqrt{F} \text{ und } l = m.a, \text{ so ist } \frac{(Fl^2.)^{1|4}}{P^{1|s}} = \frac{a\sqrt{m.}}{P^{1|s}} = \frac{\sqrt{F.}\sqrt{m.}}{P^{1|s}}$$

Diese Darlegung zeigt nun aber, wo der wirkliche Mangel der Aufstellungen von REICHEL und LEGAL liegt; es ist der Vortheil der Flügellänge an sich wahrscheinlich etwas zu hoch angeschlagen worden; dadurch, dass angenommen wurde, es wachse der Vortheil der relativen Flügellänge in gleichem Maasse proportional der Quadratwurzel von m, und proportional der Quadratwurzel des absoluten Werthes der Flügelfläche.

Die Auseinandersetzungen in Cap. 2 und 3 zeigen, dass die Flügellänge kaum von einem so grossen Einfluss ist. Als Flügelziffer würde also vielleicht richtiger der Ausdruck $\frac{(Fl)^{1|s}}{P^{1|s}}$ gewählt werden.

Nach REICHEL und LEGAL hängt nun also die Fähigkeit besser oder schlechter zu fliegen bei Thieren von demselben Gewicht vor Allem ab:

1) von der relativen Mächtigkeit der Flugmuskulatur,
2) von der Form des Flügels: der Quadratwurzel von m,
3) von der Quadratwurzel der relativen Flügelgrösse,

sie ist also $= f\left(\frac{p.(Fl)^{1|4}}{P\ P^{1|s}}\right)$ = Flugziffer. Wirklich stimmen hiermit die Befunde gut überein. Es zeigt sich nun aber bei der Berechnung desselben Verhältnisses für Thiere von verschiedenem Gewicht, dass dieses Verhältniss hier durchaus nicht mehr vollkommen parallel läuft dem Grade der Flugfähigkeit nach gewöhnlichem Begriff.

Die beiden Autoren haben dies nicht übersehen, wie nach MÜLLENHOFF's Kritik (pg. 416) ihrer Arbeit vermuthet wer-

den müsste; sie haben im Gegentheil aus ihren zahlreichen und sehr mühsamen Beobachtungen den Schluss gezogen, dass obiger Quotient mit zunehmendem Körpergewicht wachse, während die wirkliche Fähigkeit zu fliegen nicht grösser werde; dass also entweder die relative Muskelmenge oder die Flügelziffer (relative Grösse oder Länge des Flügels oder beides) etwas zunehmen müsse, damit bei gösseren Thieren ein gleich schneller und gewandter Flug möglich ist, wie bei kleineren.

Wenn nun auch die genaue Taxation der Flugleistungen etwas Missliches ist, so ist doch dieses Resultat bemerkenswerth, zumal da von den grösseren Fliegern meist nicht verlangt wurde, dass ihre absoluten Geschwindigkeiten wie $P^{1/6}$ wachsen, sondern nur dass diese ungefähr gleich bleiben.

Besonders lehrreich ist die folgende Zusammenstellung (S. 26):

Thierart:	Gewicht:	Flugziffer:
Sterna	53	1,7693
„	116	2,666
„	174	3,287
Vanellus	190	2,772
„	232	2,927
Limosa	208	1,4874
„	220	1,5317
„	227	1,5545
„	235	1,8524
Pandion haliaët.	1950	2,95214
Aquila. haliaëtos	3055	3,2751
Perdix	320	0,4165
„	375	0,4835
Charadrius	170	1,3655
„ pluv.	190	1,5786
Tringa	49,5	1,0952
„	120	1,1797
Anas	606	0,98307
„	1116	1,5549
Larus argent.	842	1,7426
„ „	1035	1,7077
„ „	1080	1,8726
„ „	1225	2,1477

Die Tafeln, welche die verschiedenen von Reichel und Legal untersuchten Verhältnisse in ihrer Abänderung übersichtlich vorführen und leider ihrem Aufsatze nicht beigedruckt sind, befinden sich in meinem Besitz; sie sind nach demselben Princip hergestellt, welches nachher von Müllenhoff in noch correkterer

Weise angewandt worden ist. Zur Ermittelung der zuletzt erwähnten Resultate z. B. sind links am Rand der Tafel die Thiere nach ihren Gewichten geordnet, oben am Rand aber nach dem Verhältniss der Flugziffer. Von den 2 Stellen in den beiden Colonnen, wo dasselbe Thier vertreten ist, gehen eine horizontale und eine verticale Linie aus, erstere gleichsam als Abscisse und Mass des Quotienten Q, letztere als Ordinate, entsprechend dem Körpergewicht. Die Stelle, wo die Linien zusammentreffen, stellt den Ort des Thieres in dem Diagramm dar. Es fehlt nur, dass die Abstände in den Colonnen genau proportional den Unterschieden im Werth von P und Q gemacht sind. Solches wäre nöthig, wollte man, wie MÜLLENHOFF es versucht hat, feststellen, nach welchem mathematischen Verhältniss die eine Grösse bei der Aenderung der andern sich ändert. Die Thatsache und der Sinn der Aenderung aber konnte auch an den Tafeln von REICHEL und LEGAL festgestellt werden.

Aus den Messungen von REICHEL und LEGAL über das Gewicht der Muskeln geht hervor, dass im Grossen und Ganzen die Menge der Muskulatur im Verhältniss zum Körpergewicht bei wachsendem Körpergewicht eher etwas ab- als zunimmt[1]); bei ungefähr gleich grossem Flugvermögen würden daher die grösseren Flieger wesentlich durch einen relativ grösseren Flügel ausgezeichnet sein (R. u. L. pg. 28).

Dieser Befund stimmt mit dem von uns theoretisch Erschlossenen (pg. 243) überein. Ferner zeigte sich, dass die Hebemuskeln des Flügels mit zunehmendem Körpergewicht relativ kleiner werden. Der von den beiden Autoren geltend gemachte Erklärungsgrund (seltenere Hebung des Flügels) ist nicht von der Hand zu weisen, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass dadurch die nöthige Zeit gewonnen wird, um den Widerstand der Luft zur Hebung mit zu benutzen (s. pg. 206 dieser Abh.).

Die fleissigen Untersuchungen von REICHEL und LEGAL wurden in dem Breslauer anatomischen Institute angestellt, wo auch meine eigenen Studien über die Flugbewegung wesentliche Förderung erfahren haben.

---

[1]) Untersuchungen über diesen Punkt sind auch schon von HARTING und MAREY angestellt worden.

Schlusswort.

Das folgende ausführliche Inhaltsverzeichniss wird am besten geeignet sein, uns den Gang der Untersuchung ins Gedächtniss zurückzurufen. In den Vorbemerkungen und in den zwei ersten Haupttheilen der Schrift war das Hauptaugenmerk darauf gerichtet, das Wechselspiel der äusseren und inneren Kräfte beim horizontalen Normalfluge in allen seinen Theilen zu verfolgen. Es wurde gezeigt, wie aus der Form der Bewegung auf die äusseren und inneren Kräfte geschlossen werden kann. Es gelang, die resultirende Einwirkung sämmtlicher inneren Kräfte, welche die Stellung des Flügels zum Rumpfe zu ändern streben, durch die Kraft $G_{\mu tg}$ in der ε-Tangentenebene zu ersetzen und zu berechnen und die resultirende Arbeitsleistung der inneren Kräfte am Schultergelenk (exclusive Reibungsarbeit und incl. die an den passiven Hemmungsapparaten der Flügelexcursion geleistete Arbeit) zu ermitteln. Die unentbehrliche Grundlage für derartige Untersuchungen bildet aber eine genaue Kenntniss der Form der Bewegung. Es wurde gezeigt, wie viel hier der Forschung noch zu thun übrig bleibt. Im dritten Haupttheil wurde zunächst wahrscheinlich gemacht, dass die Muskelmenge der Muskelarbeit bei der gebräuchlichsten Thätigkeit proportional ist, indem Querschnitt und Länge des Muskels nicht bloss der einmaligen Leistung von Spannung und dem Totalbetrag der einmaligen Excursion angepasst, sondern auch von den zeitlichen Verhältnissen der Spannungen und der Excursion (Excursionsgeschwindigkeit der Endpunkte) beeinflusst sind, und indem auch in den Anordnungsverhältnissen der Muskeln und in der Art ihrer Betheiligung an der Aktion ein Princip der Oeconomie Geltung haben kann. Dass eine solche Oeconomie wirklich besteht, wurde durch einige Thatsachen (Arbeitssammlung, Circumductio des Flügels) wahrscheinlich gemacht; ob auch sie durch Anpassung an die Funktion zu Stande kommen kann, und wie weit solches der Fall ist, wurde nicht weiter in Erwägung gezogen.

Es gelang nun mit Hülfe dieser Voraussetzungen eine grosse Reihe von Beziehungen aufzuklären: den Einfluss der Abänderung des Schlagwinkels, der Zeit T, t und τ, der Form und der Grösse des Flügels auf die Muskelarbeit und den Bedarf an Muskelmenge; die Verhältnisse der Arbeitsleistung bei verschiedenen Horizontalgeschwindigkeiten, beim Steigen, beim Schweben und Kreisen; endlich

den Einfluss des Körpergewichtes auf die Flugweise, auf das Verhältniss der Muskelarbeit und Muskelmenge zur Flugleistung, auf die Eigenschaften der Muskelsubstanz und auf die Anordnungsverhältnisse von Muskeln und Skelet.

Die Erfahrung: Quo minora sunt animalia, eo majores faciunt saltus, welche Borelli registrirt und zu erklären versucht hat, für welche aber erst das Helmholtz'sche Theorem ein volles Verständniss anbahnte, sie gilt auch für den Flug der Vögel und konnte mit Hülfe der genannten Voraussetzungen von mir eingehender begründet werden.

Ich habe in den letzten Abschnitten meiner Schrift Manches nur angedeutet, was bereits jetzt weiter hätte ausgeführt werden können. Ein Mehreres aber muss durch besondere Untersuchungen weiter verfolgt und erhärtet werden. Dies gilt besonders für die Abänderungen in der Qualität und den Anordnungsverhältnissen der Muskulatur, je nach dem Bau, dem Gewicht und den Leistungen des Apparates. Es wird in Zukunft nicht mehr genügen, bei vergleichend physiologischen Untersuchungen über das Muskelsystem einzelne Verhältnisse, z. B. die absolute Muskelkraft für sich allein in Betracht zu ziehen. Neue Wege der Forschung sind uns vorgezeichnet, schwieriger zwar zu begehen, aber zu lohnenderem Ausblick führend.

Inhaltsübersicht.

Vorbemerkungen.

Seite

Definitionen (Flug, Normalflug), Begrenzung der Aufgabe. Biologische Zielpunkte der Untersuchung. Vorfragen. Rechtfertigung der Unternehmung . . . . . 1—7

Periodicität der relativen und absoluten Bewegungen und der Abänderung der Kräfte beim Normalflug. Periodisches Gleichgewicht der verschiedenen Kräfte an den verschiedenen Theilen und am Ganzen. Graphische Methode; Kräftecurven, Kräftefelder und Wegkörper; horizontaler, auf- und absteigender Normalflug (Fig. 1—4). Plan der Untersuchung . . . . . 7—18

I. Die Form der Bewegung.

A. Disposition der Maschine . . . . . 21—36

Wichtigkeit der anatomischen Untersuchung. Hauptgliederung des Vogelkörpers. Bau und Skelet des Rumpfes und Flügels (Fig. 5). Verhältnisse des Gefieders (Fig. 6). 21

Beeinflussung der Form des Flügels durch äussere und innere Kräfte. (Fig. 7. In derselben sind irrthümlicher Weise die grossen Federn der Schwinge so dargestellt, als ob je eine äussere die nächst innere deckt, während das Umgekehrte der Fall ist) 31

B. Gesichtspunkte und Definitionen bei der Untersuchung der Form der Bewegung und der Luftwiderstände . . . . . 36—44

Relative und absolute Bewegung. Hauptrichtungen und Hauptebenen. Beobachtung aus verschiedenen Richtungen (Projektion der Bewegung auf verschiedene Ebenen). Schlagwinkel. Richtung der Flügelfläche als Ganzes; Längslinie und Sagittalprofile. Pronation und Supination. Aufwärts- und Abwärtsrollung. Verwerthung der MAREY'schen Registrirversuche . . . 36

Normen bei der Beurtheilung und Zerlegung der Luftwiderstände . 42

Gesetze des Luftwiderstandes 43

Seite

C. Angaben der Autoren über die Form der Bewegung und die dabei erzeugten Luftwiderstände . . . . . 44—68

Borelli, Barthez, Zachariae, Straus-Dürckheim, Joh. Müller, Prechtl, Giraud-Teulon, d'Esterno, Krarup-Hansen, Pettigrew (Fig. 8 u. 9), Marey (Fig. 10), Tatin. 44

Zusammenfassung 66

D. Eigene Beobachtungen über die Form der Bewegung . . 68—80

Cypselus apus, Hausschwalben, Krähen (Fig. 11), Storch, Tauben, Möven 68

Zusammenfassung (Richtung des Schlages, Grösse des horizontalen und verticalen Schlagwinkels, Richtungsänderung der Sagittalprofile des Flügels, Zahl der Flügelschläge, zeitliches Verhältniss zwischen Niederschlag und Hebung) 77

E. Neue Registrirmethoden.

Momentanphotographie (Muybridge, Marey (Fig. 12), O. Anschütz). Modelliren . . . . . 80—84

F. Die Trajectorien der Oberflächenpunkte des Vogelkörpers beim horizontalen Normalflug. Folgerungen bezügl. der Widerstände . . . . . 84—102

Vorbemerkungen.

1. Oscillationen des Rumpfes unerheblich.

a. Anhaltspunkte zur Beurtheilung des Trajectoriums der Flügelspitze (Fig. 13) 84

b. Trajectorien der übrigen Punkte. Verhalten des Luftwiderstandes an denselben bei der Hebung und dem Niederschlag . . . 88

c. Resultirende Einwirkung der Luftwiderstände 94

2. Berücksichtigung der Oscillationen des Rumpfes.

Vorbemerkungen.

a. Relative Bewegung gegenüber dem Gesammtschwerpunkt . . 95

b. Die Oscillationen des gemeinsamen Schwerpunktes 96

c. Ausnützung grösserer Rumpfoscillationen. Verhalten bei relativ grossem und relativ kleinem Rumpfgewicht. Diagramm der gleichzeitigen verticalen Bewegungen der Schwerpunkte s, S und Σ (Fig. 14). Bewegung des Flügels (Fig. 15) 96

II. Das Wechselspiel der Kräfte.

Einleitung.

α. Uebersicht über die Wirkung der äusseren und der gesammten inneren Kräfte auf Flügel und Rumpfschwerpunkt 101—112

Seite

A. Die verticale Einwirkung der äusseren und der resultirenden inneren Kräfte am Flügel auf den Flügelschwerpunkt. Bezeichnungen und Symbole 107

a. Der Flügel beim Niederschlag. Widerstand, innere Kräfte, Schwere 108

b. Der Flügel bei der Hebung 110

B. Die verticale Einwirkung sämmtlicher Kräfte am Rumpf auf den Rumpfschwerpunkt 111

β. Curven dieser Kräfte . . . . . 112—120

Vorbemerkungen 112

A. Die auf den Flügel wirkenden verticalen Kräfte in ihrer Abänderung nach der Zeit. Curventafel (Fig. 16) 113

B. Die auf den Rumpf einwirkenden verticalen Kräfte. Curventafel (Fig. 17) 117

C. Horizontale Kräfte 119

γ. Die Einzelwirkungen der inneren Kräfte zwischen Rumpf und Flügel . . . . . 120—152

A. Allgemeines.

Verbindung im Schultergelenk.

1. Aeussere Kräfte am Flügel. Zerlegung nach dem Gelenkdrehpunkt *o* und der „ε-Tangentenebene" (Fig. 18). Lage von ε (Fig. 19). Zusammenfassung 120

2. Wirkung der inneren Kräfte, welche entfernt von *o* liegen. 125

3. Innere Kräfte, welche durch den Drehpunkt *o* wirken (Gelenkaxenkräfte) 127

4. Zusammenfassung 129

B. Specielles.

1. Die Wirkung des Flügelgewichtes 130

2. Die auf den Flügel wirkenden Widerstände 131

3. Der Widerstand gegenüber den Centrifugalkräften am Flügel (Cf) 135

4. Die Kraft *Df*, welche vom Rumpf aus durch *o* auf den Flügel wirken muss, damit das an sich mit gleichförmiger horizontaler Geschwindigkeit bewegte Gelenkende *o* den resultirenden Oscillationen des Rumpfes folgt (Fig. 20) . 136

5. Die nothwendigen inneren Gelenkdrehkräfte. Quere Componenten 139

a. Berechnung von $G\varepsilon v$ und $-G\varepsilon v$ (Fig. 21) . . . 141

b. Berechnung von $G\varepsilon z$ und $-G\varepsilon z$ (Fig. 22 u. 23) 144

c. Berechnung von $G\varepsilon q$ und $-G\varepsilon q$ 150

6. Natur der inneren Gelenkdrehkräfte 150

δ. Die pronirenden und supinirenden Kräfte am Flügel und die Einflüsse, welche den Rumpf und das ganze System zu drehen streben . . . . . 152—158

a. Rotirende Einflüsse am Flügel 152

Seite

b. Drehende Einflüsse am Rumpf und am ganzen System 154

ε. Rückblick und Hinweis auf weitere Ziele der Untersuchung . . . . . 158—160

III. Die nothwendige Menge und Vertheilung der Muskulatur.

A. Allgemeiner Theil.

1. Versuch Prechtl's, die Muskelkraft beim Fluge zu bestimmen (Fig. 24). Eigene Berechnung der von den inneren Kräften resultirend geleisteten verticalen Arbeit 163

2. Plan der eigenen Untersuchung 169

3. Verhältniss des Stoffumsatzes zu der äusseren Arbeit der Muskeln 170

4. Wovon hängt die Länge eines Muskels und die Grösse seines Querschnittes ab? . . . . . 170—180

Bedeutung der zeitlichen Verhältnisse: der Excursionsgeschwindigkeit und der Dauer der Spannung. Verschiedene Muskelqualitäten je nach den Arbeitsformen. Vermuthung, dass einer grösseren Excursionsgeschwindigkeit eine geringere Leistungsfähigkeit des Querschnittes entspricht und umgekehrt, wenigstens da, wo die ganze Leistungsfähigkeit hoch entwickelt ist 172

Zusammenfassung 178

5. Ueber den Grad und die natürlichen Grenzen der Oeconomie in den Anordnungsverhältnissen der Schultermuskulatur . . . . 180—188

a. Die Aenderung der Richtung der resultirenden inneren Gelenkdrehkraft in der Zeit (Fig. 25) 180

b. Umänderung der Lageverhältnisse irgend eines Muskels am Schultergelenk bei der Flugaktion. Bedeutung der Betheiligung verschieden gerichteter Muskelfasern an einer resultirenden Spannung, und der circumductio des Flügels für die Oeconomie (Fig. 26). Princip des Arbeitssammlers (Fig. 27) 182

6. Vorbemerkungen über das Verhältniss der Muskelarbeit zu der locomotorischen Leistung 188

B. Specieller Theil.

1. Der Einfluss der Anzahl der Flügelschläge und der Grösse des Schlagwinkels 190

2. Der Einfluss der Flügelform 194

3. Der Einfluss der Grösse der Flügelfläche 197

4. Das Verhältniss von $t : \tau$ und T. Hebemuskulatur des Flügels 204

5. Abhängigkeit der Muskelarbeit von der Geschwindigkeit der Bewegung des Ganzen gegenüber dem umgebenden Medium (Fig. 28). Steigen. Beginn des horizontalen Fluges. Stationärer Flug, Rütteln. Einfluss der Geschwindigkeit beim horizontalen Normalflug. Bogenflug kleiner Vögel. Nutzen langer Flügel 207

Prechtl's Angaben über die Wirkung des Flügelschlages zur Vorbewegung 214

Seite

6. Aenderung der Verhältnisse des Rumpfes. Umwandlung von locomotorischer Kraft der x-Richtung in Auftrieb (Drachenwirkung) (Fig. 29) 216
7. Drachenwirkung auf beliebigen Trajectorien, Schweben. Flug in Wellenlinien. Kreisen . . . . . 220—238
   a. Schweben in ruhender oder gleichmässig bewegter Luft (Fig. 30, 31 u. 32). Periodische Anstrengung zum Wiedergewinn der verlorenen Energie. Beurtheilung der nothwendigen Muskelspannung zur Fixation des Schultergelenkes. Zusammenfassung 221
   b. Drachenflug in ungleichmässig bewegter Luft 235
8. Aenderung der Verhältnisse des Fluges bei Aenderung aller Dimensionen des Flugthieres . . . . . 238—251
   Geometrische Aehnlichkeit der Bewegung. Gleiches relatives Flugvermögen. Arbeit der Gelenkdrehkräfte. Muskelmenge. Grenze für die Grösse eines Flugthieres. Das Helmholtz'sche Theorem. Oeconomisches in dem Fluge grosser Thiere. Die ersten Flieger 238
   Aenderung in der Form der Arbeitsleistung der resultirenden Gelenkdrehkraft 245
      a. Grenzen der Anpassungsmöglichkeit der Muskulatur beim Wachsthum der Dimensionen 247
      b. Bei Verkleinerung der Dimensionen. Pneumaticität 249
   Ermittelungen über die Grösse des Excursionscoefficienten . 250
9. Untersuchungen über die thatsächlichen Abänderungen der Flugverhältnisse und Flugapparate.
   De Lucy. Harting. Marey. Mouillard und Müllenhoff. Reichel und Legal . . . . . 251—156

Schlusswort.

NOV 5 - 1915

Frommannsche Buchdruckerei (Hermann Pohle) in Jena.

Frommannsche Buchdruckerei (Hermann Pohle) in Jena.